

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Arquitectura



**Metodología de actuación energética
prioritaria ante los escenarios de cambio
climático en Zonas Urbanas Homogéneas
(HUZs)**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Helena López Moreno

Arquitectura Técnica

Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Doctorado en Construcción Y Tecnología Arquitectónicas

**Metodología de actuación energética
prioritaria ante los escenarios de cambio
climático en Zonas Urbanas Homogéneas
(HUZs)**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Helena López Moreno

Arquitectura Técnica

Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

Bajo la dirección de:

Dr. Francisco Javier Neila González

Dra. Silvia Soutullo Casto

Madrid, 2024

Título: Metodología de actuación energética prioritaria ante los escenarios de cambio climático en Zonas Urbanas Homogéneas (HUZs)

Autor: Helena López Moreno

Programa de Doctorado: Construcción y Tecnología Arquitectónicas

Dirección de tesis:

Dr. Francisco Javier Neila González, Catedrático Emérito.

Universidad Politécnica de Madrid

Dra. Silvia Soutullo Castro, Científica Titular.

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España; un contrato predoctoral (10-PREEE-18) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España para el Centro de Investigaciones en Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT.

Agradecimientos

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que me han acompañado y apoyado a lo largo de este enriquecedor viaje. Sin su ayuda y constante respaldo, este logro no habría sido posible.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis directores de tesis, la Dra. Silvia Soutullo y el Dr. Javier Neila, por su invaluable guía, paciencia y consejos durante todo este proceso, pero sobre todo por ser referentes en el ámbito científico y personal. A Silvia, por su ánimo, empatía e inspiración, que han sido fundamentales en esta etapa. A Javier, por su constante disponibilidad y por abrirme las puertas al fascinante mundo de la arquitectura bioclimática.

Al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) por financiar este trabajo mediante un contrato predoctoral a través del Ministerio de Ciencia y Universidades, que ha hecho posible este trabajo y por permitir desarrollar mi carrera profesional.

Quiero expresar mi gratitud al Dr. Tianzhen Hong y al equipo de la *Building Technology and Urban Systems Division* por acogerme durante mi estancia internacional en el *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) y por permitirme participar en sus proyectos de lo que tanto he aprendido. Agradezco a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) no solo por cimentar mi formación académica, sino también por facilitar esta excelente oportunidad a través de sus becas de movilidad.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a la Dra. Emily Prestwood y al Dr. I.A. Grant Willson por tutorizarme durante mi experiencia investigadora en el *Birmingham Energy Institute*. Al programa *Pioneers* del *EIT Climate-KIC*, gracias por financiar esta estancia que ha ampliado mis horizontes.

Agradezco el trabajo y recomendaciones de los evaluadores externos, Núria Casquero-Modrego y a Erica Norma Correa por sus valiosos comentarios y celeridad. Además, me gustaría expresar mi agradecimiento a los miembros del Comité de Tesis, por su tiempo y disponibilidad.

No podría dejar de mencionar a mis compañeras y compañeros de la unidad UiE3 del CIEMAT, su apoyo, intercambio de ideas y trabajo conjunto me han permitido crecer tanto profesional y personalmente. En especial gracias por vuestra ayuda durante esta última etapa. También a la Escuela Técnica de Aparejadores y a los integrantes del grupo ABIO (UPM), con los que comencé esta aventura.

A mis amigas y amigos, con los que tengo muchas celebraciones pendientes. Gracias por ser una constante y necesaria fuente de alegría, motivación, ánimo y en especial por estar a mi lado en todo momento.

A mi familia, por su cariño incondicional. En especial, a mis padres, por inculcarme el valor del esfuerzo y por darme la oportunidad de llegar hasta aquí. A Iñaki y Anne, por su ayuda con la revisión en inglés y, principalmente, por transmitirme su espíritu de curiosidad, motivación y entusiasmo.

Finalmente, a Rodri, gracias por tus ánimos, por confiar en mí y por tu comprensión sin límites; contigo este camino ha sido mucho más fácil.

A todos, muchísimas gracias.

Abstract

Energy retrofitting strategies are essential for mitigating climate change, reducing building energy dependence, fostering decarbonisation, and improving housing habitability [1]. However, rates of energy retrofitting continue to be extremely low (below 1% in Europe and, in Spain, even minimum established goals are not being reached) [2], [3]. Primary barriers include macro-level energy policies that are not sufficiently responsive to climate trends and urban contexts, as well as the lack of a multi-dimensional perspective, which limits energy retrofitting projects, especially in the most vulnerable households, which typically cannot afford the high costs of such projects [4]

This study encourages the development of plans that are tailored to the actual needs of communities in order to achieve an equitable and just energy transformation, using the city of Madrid as a case study. An integrated methodology is proposed that combines the analysis of current and future climate conditions with socioeconomic factors, using the concept of Homogeneous Urban Zones (HUZs) to identify priority areas for energy retrofitting. To this end, an updated typical meteorological year (TMY) has been generated for Madrid, which is based on 15 years of field data and future projections that align with the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). These scenarios are used to model the energy performance of the HUZs, calculating energy demand and building thermal stress for a representative city block. The methodology used enables the extrapolation of results at the city level, thus optimizing time and resources. Furthermore, a thermal risk index has been created, combining the factors of exposure (energy demand) and vulnerability (household income) to identify households where energy retrofitting and related adaptation based on available financial resources are crucial.

The study's results show that the current climate in Madrid is warmer and drier than other reference climates, with heating needs decreasing by 60% and cooling demands doubling. By 2050, the average annual temperature is expected to increase by between 1.5°C - 3.1°C, depending on the mitigation and adaptation strategies applied. With average indoor temperatures estimated to reach 34°C in August and the heat stress period expected to increase by one month, heating demand is expected to decrease by an additional 25% and cooling demand is expected to double.

Building energy performance within HUZs is largely dependent on the urban context, building characteristics, and type of construction, highlighting the usefulness of the proposed methodology. In Madrid, 12 types of HUZs were identified. Semi-sprawling blocks are the most efficient due to their insulation and design, while long low-rise blocks, especially those in single row configurations, are the least efficient, due to their high level of exposure and associated energy inefficiency. Ground-floor dwellings tend to have the highest heating demands, while upper-floor dwellings tend to have the highest cooling demands. However, incorporating ground-floor commercial spaces or attic spaces can have an impact.

This study calculates the thermal risk index for each building in Madrid, demonstrating that the first peripheral ring, with closed blocks and low-rise open blocks, presents the highest thermal risk, thus highlighting the need for energy retrofitting in neighbourhoods such as San Cristóbal and Amposta.

The primary central ring, which includes the historical city center and the Ensanche areas, presents a medium level of thermal risk, while the outer ring, with semi-sprawling blocks and modern single-family homes, presents the lowest level of thermal risk.

This study concludes that the proposed methodology, which is replicable in cities beyond Madrid, can serve as a vital tool in the effort to address current and future urban energy challenges in the face of climate change.

Resumen

Las estrategias de rehabilitación energética son cruciales para mitigar el cambio climático, reducir la dependencia energética, fomentar la descarbonización y mejorar la habitabilidad de las viviendas [1]. Sin embargo, la tasa de renovación europea es extremadamente baja, inferior al 1%, y en España no alcanza los mínimos establecidos [2], [3]. Entre las principales barreras se encuentran políticas energéticas generalistas, que no abordan adecuadamente las tendencias climáticas y la contextualización urbana. Además, la falta de una visión multifactorial limita la renovación, especialmente en hogares vulnerables, que no pueden asumir el alto coste de las intervenciones [4].

Este trabajo fomenta la elaboración de planes adaptados a las necesidades reales de la población con el fin de lograr una transformación energética equitativa y justa. En este sentido, se propone una metodología integral que combina el análisis de condiciones climáticas actuales y futuras con factores socioeconómicos, utilizando el concepto de Zonas Urbanas Homogéneas (HUZs) para identificar áreas prioritarias de intervención energética, tomando como caso de estudio la ciudad de Madrid. Para ello, se ha generado un año meteorológico tipo (TMY) actualizado de la ciudad, basado en 15 años de datos experimentales y sus proyecciones de acuerdo al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Estos escenarios se emplean en el modelado energético de las HUZs, definidas como áreas representativas a nivel de bloque urbano, donde se calcula la demanda energética y el estrés térmico edificatorio. La metodología permite extrapolar los resultados a nivel de ciudad, optimizando recursos y tiempo. Además, se ha creado un índice de riesgo térmico que combina exposición (demanda energética) y vulnerabilidad (renta de los hogares), identificando viviendas donde la intervención energética y su adaptación económica son esenciales.

Los resultados muestran que el clima actual en Madrid es más cálido y seco que otros climas de referencia, sobrestimándose la calefacción en un 60 % y duplicándose las demandas de refrigeración. Por otro lado, en 2050, se prevé un aumento de la temperatura media anual de entre 1,5 y 3,1 °C, dependiendo de las estrategias de mitigación y adaptación aplicadas. Esto reducirá la demanda de calefacción en un 25 %, pero duplicará la de refrigeración, extendiéndose el periodo de estrés por calor en un mes y alcanzando temperaturas interiores medias de 34 °C en agosto.

El comportamiento energético edificatorio de las HUZs depende en gran medida de las características urbanas, edificatorias y constructivas, lo que resalta la relevancia del método propuesto. En Madrid, se identificaron 12 clases de HUZs. Los bloques semiabiertos son los más eficientes gracias al aislamiento térmico y diseño, mientras que los bloques abiertos de baja altura, especialmente los de hilera simple, son los menos eficientes debido a su alta exposición e ineficiencia de la envolvente. Las mayores demandas de calefacción se producen en las plantas bajas, y las de refrigeración en las plantas altas. Sin embargo, la incorporación de locales o espacios bajo cubierta modifican esta situación.

El índice de riesgo térmico se ha calculado para cada edificación de la ciudad, mostrando que el primer anillo periférico, con bloques en manzana cerrada y edificaciones abiertas de baja altura, presenta el mayor riesgo térmico, destacando barrios como San Cristóbal o Amposta, donde su intervención

energética debería ser prioritaria. Las áreas del centro, con zonas urbanas de casco histórico y Ensanche, tienen riesgos medios, mientras que el último anillo, con bloques semiabiertos y viviendas unifamiliares modernas, presenta el menor riesgo térmico.

Esta investigación concluye que, la metodología propuesta, aplicada en Madrid, pero replicable en otras ciudades, se presenta como una herramienta clave para abordar los desafíos energéticos urbanos actuales y futuros frente al cambio climático.

Índice

<i>Agradecimientos</i>	<i>vii</i>
<i>Abstract</i>	<i>viii</i>
<i>Resumen</i>	<i>x</i>
1. Introducción	1
1.1. Justificación de la investigación	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodología y descripción de contenidos	3
2. La rehabilitación energética en Europa y España	6
2.1. Necesidades de la rehabilitación energética	6
2.1.1. Impacto del cambio climático	7
2.1.2. Características del parque edificatorio	10
2.1.3. Características poblacionales	14
2.2. Objetivos y políticas de rehabilitación energética	18
2.2.1. Evolución del marco regulatorio europeo	19
2.2.2. Evolución del marco regulatorio español	22
2.2.3. Evolución y análisis de los programas de ayudas en España	25
2.3. Identificación de la rehabilitación energética preferente	27
2.3.1. Características de las herramientas de modelado térmico y energético	29
2.3.2. Metodologías de identificación energética prioritaria	34
2.3.3. Estrategias de descarbonización en los hogares	36
2.4. Conclusiones	41
3. La ciudad de Madrid como caso de estudio	43
3.1. Características del municipio	43
3.2. Evolución y forma del urbanismo	44
3.3. Evolución edificatoria y técnicas constructivas	52
3.4. Mínimos de habitabilidad. Avance de la normativa	56
3.5. Conclusiones	62
4. Tendencias climáticas en un contexto urbano	64
4.1. Base de datos climática	64
4.1.1. Campaña experimental	65
4.1.2. Generación de Año Meteorológico Tipo experimental (TMY)	66
4.1.3. Escenarios climáticos futuros (SSPs)	68
4.2. Clima representativo para el análisis edificatorio	70

4.2.1.	Temperatura del aire exterior	70
4.2.2.	Humedad relativa	71
4.2.3.	Velocidad del viento	72
4.2.4.	Radiación global horizontal	73
4.3.	Índices de impacto para la evaluación climática	75
4.3.1.	Indicadores climáticos, urbanos y edificatorios	75
4.3.2.	Cuantificación del impacto climático	77
4.4.	Conclusiones	79
5.	Zonas Urbanas Homogéneas. Entornos representativos.	82
5.1.	Iniciativas e indicadores para clasificar el contexto urbano.	82
5.2.	Identificación de HUZs representativas. Aproximación urbana	84
5.2.1.	Recopilación de datos. Fase 1	84
5.2.2.	Caracterización de los clústeres urbanos. Fase 2	87
5.2.3.	Validación estadística. Fase 3	89
5.2.4.	Ponderación y proximidad de indicadores urbanos.	92
5.3.	Caracterización del entorno representativo de las HUZs	93
5.3.1.	Análisis estadístico de la metodología HUZ	93
5.3.2.	Clasificación y representación de HUZs definitivas	99
5.3.3.	Interpretación de las clases HUZs	100
5.4.	Conclusiones	102
6.	Zonas Urbanas Homogéneas. Edificios Representativos	105
6.1.	Iniciativas e indicadores para clasificar el parque edificatorio.	105
6.2.	Identificación de HUZs representativas. Aproximación edificio	107
6.2.1.	Nivel edificatorio. Área de influencia edificatoria HUZ.	108
6.2.2.	Nivel constructivo. Clasificación para la caracterización energética.	111
6.2.3.	Localización y selección de edificios representativos HUZs	113
6.3.	Caracterización de los edificios representativos de cada HUZ	116
6.3.1.	Características geométricas	117
6.3.2.	Características constructivas	121
6.3.3.	Perfiles e intensidad de comportamiento de los usuarios	125
6.4.	Conclusiones	126
7.	Comportamiento energético-térmico de las viviendas HUZs	129
7.1.	Modelado energético edificatorio	129
7.1.1.	Modelización de las viviendas	130
7.1.2.	Parámetros de estudio	131
7.1.3.	Contraste del modelo	132
7.2.	Demanda energética edificatoria de las viviendas HUZs	135
7.2.1.	Comportamiento energético para los diferentes escenarios climáticos	135
7.2.2.	Detalle del comportamiento energético a nivel edificio y por plantas	137

7.3. Estrés térmico interior de las viviendas HUZs	140
7.3.1. Temperatura interior de las viviendas	140
7.3.2. Intensidad del estrés térmico para los diferentes escenarios climáticos	142
7.3.3. Detalle de la intensidad del estrés térmico a nivel edificio y por plantas	143
7.4. Conclusiones	147
8. Metodología de actuación energética prioritaria	150
8.1. Base de datos de Madrid. Indicadores energéticos prioritarios	150
8.1.1. Definición del nivel de exposición energética-térmica de la ciudad	152
8.1.2. Definición del nivel de vulnerabilidad socioeconómica	154
8.2. Representación del índice de riesgo energético	155
8.2.1. Definición del índice de riesgo energético	155
8.2.2. Relación entre el índice de riesgo y las Zonas Urbanas Homogéneas	156
8.3. Conclusiones	160
9. Conclusiones y futuras líneas de investigación	162
9.1. Conclusiones del estudio	162
9.1.1. Relacionadas con la metodología	162
9.1.2. Relacionadas con los resultados obtenidos	164
9.2. Futuros trabajos de investigación	168
9.3. Indicios de calidad	170
10. Conclusions and future lines of research	174
10.1. Study conclusions	174
10.1.1. Related to the methodology	174
10.1.2. Results-based conclusions	176
10.2. Future research work	180
10.3. Indicators of quality	181
Referencias bibliográficas	186
Lista de figuras	216
Lista de tablas	220
Abreviaturas y acrónimos	221

1. Introducción

Este capítulo presenta e introduce la investigación que se ha llevado a cabo.

En línea con ello, se justifica y contextualiza la conveniencia del estudio. Además, se detalla la hipótesis planteada, se presentan los objetivos propuestos y se describe la metodología que se ha seguido para alcanzar estas metas.

1.1. Justificación de la investigación

La rehabilitación energética adopta un enfoque holístico que permite abordar los principales desafíos de las ciudades españolas, caracterizadas por un parque edificatorio envejecido e ineficiente y por evidentes desigualdades territoriales.

Este planteamiento está alineado con los esfuerzos globales establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Pacto Verde Europeo, centrados en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes del consumo energético en áreas urbanas y en mejorar la salud de las ciudades [5], [6]. En 2022, el sector residencial en España representó más del 17 % del consumo energético final total y el 25 % del consumo eléctrico [7]. Asimismo, los eventos climáticos extremos, como olas de calor más frecuentes, intensas y prolongadas han incrementado las muertes prematuras, un fenómeno exacerbado en áreas urbanas debido al efecto del microclima urbano. En España, durante 2022, se registraron 4.789 muertes atribuibles al calor.

A pesar de los esfuerzos por promover la mejora energética de las viviendas, la tasa de renovación sigue siendo baja, situándose por debajo de los objetivos fijados por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [8]. Esto se debe principalmente al elevado coste de las medidas de rehabilitación energética, que las hace inaccesibles para los hogares con menores ingresos. Por ello, resulta esencial comprender con detalle el comportamiento energético de las ciudades y la calidad de vida de sus habitantes para diseñar políticas energéticas más eficaces. Sin embargo, diversas barreras dificultan este propósito, entre ellas:

- Representación climática imprecisa: Los años climáticos normativos y las bases de datos comúnmente utilizadas no reflejan con precisión las condiciones reales de las ciudades, subestimando especialmente las demandas de refrigeración y el estrés térmico. Además, no consideran los escenarios futuros relacionados con el calentamiento global y el cambio climático.
- Simplificación en el cálculo energético: Los métodos actuales para calcular la demanda energética y el estrés térmico suelen ser poco detallados. Mientras algunos enfoques integrales simplifican la representación del edificio, omiten el entorno urbano inmediato. Por otro lado, los modelos urbanos más avanzados requieren altos recursos humanos y computacionales, lo que limita su aplicación.

- **Políticas generalistas:** Las actuaciones energéticas suelen plantearse desde una perspectiva macro. Cuando ahondan en las condiciones energéticas y socioeconómicas, lo hacen a nivel de barrio o edificio, pudiendo dejar atrás a los hogares vulnerables, siendo éstos los más necesitados.

En este contexto, resulta crucial identificar áreas prioritarias de actuación energética considerando tanto los escenarios climáticos actuales como los futuros. Esto no solo mejorará las condiciones de habitabilidad de los hogares, sino que también fomentará la descarbonización, promoviendo una reducción equitativa de los efectos del cambio climático, la degradación ambiental y la pobreza

1.2. Hipótesis

A partir de lo expuesto, esta tesis plantea la siguiente hipótesis:

La definición y caracterización energética-térmica de áreas urbanas con características similares, combinada con la integración de factores socioeconómicos, permite optimizar la identificación a gran escala de edificaciones donde las intervenciones energéticas deberían priorizarse frente a los escenarios climáticos actuales y futuros.

1.3. Objetivos

El objetivo fundamental de este trabajo es desarrollar una metodología que permita identificar, clasificar y caracterizar áreas de intervención energética prioritaria considerando factores energéticos, entre los que se incluyen condicionantes climáticos, urbanos y edificatorios, a través de la aproximación de HUZs, y su combinación con aspectos socioeconómicos, usando como caso de estudio la ciudad de Madrid.

Este método tiene como finalidad conocer de forma detallada las características de las viviendas y consecuentemente poder definir planes estratégicos de rehabilitación energética justos y adaptados a las necesidades reales de sus hogares.

A partir de este objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos:

- Contextualizar las necesidades y conocer las políticas e iniciativas de rehabilitación energética** en Europa y específicamente en España, así como analizar su adaptación al entorno construido y contexto socioeconómico actual identificando los factores clave de rehabilitación energética prioritaria
- Proponer la ciudad de Madrid como caso de estudio** justificando esta propuesta a través del estudio de las características del municipio, especialmente revisando su evolución urbana, técnicas edificatorias y constructivas de la ciudad, así como el estudio detallado de la normativa relacionada con los criterios de calidad térmica en los hogares.
- Caracterizar el clima en un contexto urbano**, a través procesamiento de las principales variables meteorológicas de una base de datos experimental. En este sentido se plantea la evaluación de las

tendencias climáticas actuales, la generación de un clima representativo experimental actualizado y su comparación con otros climas sintéticos y proyecciones a 2050 y 2080. Además, se cuantifica el impacto que estos escenarios pueden tener a nivel ambiental, desde una aproximación climática, urbana y edificatoria.

- iv) **Definir una metodología de identificación, clasificación y caracterización de Zonas Urbanas Homogéneas (HUZs)** desde la aproximación de bloque de manzana urbano, para la simulación energética-térmica. Con tal fin, se revisa los parámetros clave desde el punto de vista urbano y edificatorio para el estudio energético, incluyendo sus clasificaciones, así como la selección y cálculo de los principales indicadores (cobertura de suelo, morfológicos, geométricos y constructivos). Se propone definir las áreas HUZs combinando dichos indicadores con herramientas estadísticas y de información geográfica.
- v) **Caracterizar energética y térmicamente las edificaciones dentro de las HUZs** mediante la selección de arquetipos representativos, basados en factores urbanos, edificatorios y constructivos. Estos arquetipos se pretenden que sirvan para definir indicadores constructivos, geométricos y ocupacionales que faciliten el modelado energético posterior.
- vi) **Cuantificar la demanda energética edificatoria y el estrés térmico interior de las viviendas HUZs** mediante la simulación energética y térmica. Este modelado busca estudiar el comportamiento actual de las variables seleccionadas presente y futuro, así como compararlos con los resultados provenientes de otras evaluaciones climáticas. Adicionalmente, se pretende recopilar la información a nivel edificio y también desagregar la información por plantas.
- vii) **Generar una base de datos georreferenciada que permita calificar las viviendas en riesgo térmico** acoplando factores de vulnerabilidad y exposición, y su correlación con las HUZs. Para ello se plantea acoplar los valores simulados anteriormente con indicadores de socioeconómicos. Finalmente, se pretende definir como hogares de intervención energética prioritaria aquellos en los que se superpongan los peores valores de demanda energética y nivel de renta.

1.4. Metodología y descripción de contenidos

Este trabajo está basado en diferentes pasos enfocados en el desarrollo una metodología de actuación energética prioritaria ante los escenarios de cambio climático utilizando la aproximación HUZs. La Figura 1 esquematiza dicho método, cuyos pasos se describen a continuación:

La primera fase enmarca la rehabilitación energética en Europa y específicamente para España ([Capítulo 2](#)). En este sentido, se revisan las principales necesidades, objetivos y políticas centradas en la rehabilitación energética y se estudian las variables clave para identificar los hogares donde la actuación energética es prioritaria. La metodología propone como caso de estudio la ciudad de Madrid ([Capítulo 3](#)). Esta selección se justifica mediante el estudio exhaustivo de las características del municipio, ahondando en su evolución urbana y edificatoria. También se analiza el desarrollo de las técnicas constructivas y la normativa para garantizar mínimos de habitabilidad térmica.

Las siguientes fases desarrollan e implementan el método propuesto. Primero se estudia el clima de Madrid comparando diferentes escenarios climáticos presentes y futuros ([Capítulo 4](#)). Para ello que se toma como caso base un año climático representativo generado mediante la metodología de Año Meteorológico Tipo (TMY), a partir del procesamiento de datos de una campaña experimental de 15 años. Este TMY experimental sirve de punto de partida para caracterizar los climas futuros SSPs en 2050 y 2080. Para estos climas, se estudia su evolución comparando el clima actual y futuro mediante el análisis de las principales variables meteorológicas. Estas variables TMY, también se comparan con el clima normativo MET y el ampliamente utilizado IWECC. Finalmente, en una primera aproximación, se estudia el impacto de estos escenarios mediante el estudio de indicadores climáticos, urbanos y edificatorios.

Posteriormente se define la aproximación sistemática basada en la identificación, clasificación y caracterización cuantitativa de las HUZs para el análisis energético edificatorio, desde la perspectiva de bloque de manzana urbano. Para ello, este enfoque combina una aproximación del entorno urbano próximo ([Capítulo 5](#)) y una aproximación edificatoria ([Capítulo 6](#)). La descripción del enfoque urbano se basa en la superposición de clasificaciones urbanas existentes y el uso de indicadores urbanos para la generación de clústeres que se analizan a nivel de pixel (HUZ-Pix). Mediante un proceso *top-down* que acopla herramientas estadísticas y de geoprocésamiento de datos, los clústeres validados se identifican como HUZs representativos de la ciudad, o por el contrario se fusionan, dividen o rechazan. Por otro lado, la aproximación edificatoria transforma la escala de las HUZs, usando como unidad de análisis el edificio (HUZ-Buff), y repite el proceso ajustando los datos de los indicadores urbanos al área de influencia del edificio. Además, se evalúa como encajan estas HUZs en las clasificaciones constructivas actuales (HUZ-Cons). Este cambio de escala facilita la selección de edificios representativos HUZs que son utilizados para la caracterización energética, los cuales se seleccionan combinando áreas en las que coincide una misma HUZ desde la aproximación urbana (HUZ-Pix), edificatoria (HUZ-Buff) y clase constructiva (HUZ-Cons). Dichos arquetipos representativos HUZ se caracterizan especificando diferentes variables geométricas, constructivas y de ocupación.

La caracterización climática y edificatoria de estos arquetipos permiten definir los principales valores de entrada para la evaluación energética ([Capítulo 7](#)). De esta forma, se simulan las demandas energéticas y estrés térmico adaptativo para cada uno de los arquetipos representativos de la ciudad. Para contrastar el modelo, los resultados de temperatura del aire interior simulados utilizando el fichero climático TMY experimental, se contrastan con valores registrados durante una campaña de monitorización en viviendas. Una vez comprobado el modelo, los resultados obtenidos para el clima TMY generado, se comparan con los resultados obtenidos para los climas MET e IWECC. Además, se estudia la evolución de los valores para el escenario SSP2 en 2050 y 2080. Finalmente, esta información se calcula y analiza a escala de planta del edificio.

Los resultados energéticos y térmicos obtenidos anteriormente se infieren al resto de la ciudad mediante una aproximación *bottom-up* ([Capítulo 8](#)). Esto permite calcular el índice de riesgo térmico de la ciudad promediando el nivel de exposición (demanda energética) y la vulnerabilidad (renta de los

hogares) a partir del percentil para cada una de las edificaciones de la ciudad. Completando a esta información, se estudia el vínculo entre las tipologías HUZs y riesgo térmico.

Finalmente, la metodología recoge las principales conclusiones del estudio tanto a nivel metodológico como de los resultados obtenidos (Capítulo 9). Adicionalmente, se definen las futuras líneas de investigación y se describen las comunicaciones científicas y divulgativas originadas durante el trabajo.



Figura 1. Esquema representativo de la metodología utilizada para la definición de hogares de actuación energética prioritaria ante los escenarios de cambio climático en Zonas Urbanas Homogéneas (HUZs)

2. La rehabilitación energética en Europa y España

La rehabilitación energética reduce la demanda y consumo de los hogares y las emisiones de CO₂ asociadas al sector edificatorio. Además, mejora las condiciones de confort y habitabilidad de sus habitantes y potencia la independencia energética. Por ello, el objetivo de este capítulo se centra en contextualizar las políticas e iniciativas relacionadas con la rehabilitación energética en Europa y en España y comprobar cómo estas se ajustan a las necesidades reales de la población. En este sentido, se proponen como objetivos parciales:

- i) Enmarcar las necesidades de la rehabilitación energética en Europa y concretamente en España a través de la contextualización y caracterización de las condiciones climáticas, parque edificatorio existente y particularidades de la población (Sección 2.1.)
- ii) Evaluar los objetivos, compromisos y normativas de rehabilitación energética en Europa y España, así como sus estrategias y programas de actuación (Sección 2.2.).
- iii) Definir las aproximaciones para caracterizar térmica y energéticamente el parque edificatorio, estudiar los métodos e indicadores para identificar la rehabilitación energética prioritaria mediante la definición riesgo energético y térmico en los hogares, así como presentar las principales estrategias de descarbonización en los hogares (Sección 2.3.)

2.1. Necesidades de la rehabilitación energética

La eficiencia energética se refiere al uso optimizado de la energía, es decir, a la capacidad de realizar una tarea o producir un servicio utilizando la menor cantidad posible de energía sin comprometer los resultados [9], [10]. En términos más simples, implica obtener los mismos beneficios energéticos (como calor, luz, movimiento, etc.) utilizando menos recursos energéticos, reduciendo así el desperdicio y mejorando el rendimiento. Consiste en una amplia variedad de medidas de eficiencia energética, tales como la mejora de la envolvente mediante la incorporación de aislamiento, ventanas eficientes, hermeticidad, uso de electrodomésticos y sistemas de iluminación eficientes, actualización del sistema de climatización (HVAC) y un régimen operativo más eficaz.

En este sentido, las estrategias de eficiencia energética y en concreto la rehabilitación energética, se presentan como una solución crucial a la hora de hacer frente a los escenarios de cambio climático. Esto es debido al parque edificatorio obsoleto e ineficiente con el cuentan las ciudades europeas, su alta dependencia energética, el aumento de la desigualdad social y una población muy envejecida, la cual está más expuesta a problemas de salud.

Los siguientes puntos describen dicha situación en Europa, especificando también la situación en España y sus posibles implicaciones:

2.1.1. Impacto del cambio climático

Tendencias climáticas actuales

A medida que los impactos del cambio climático se intensifican, resulta primordial comprender sus efectos [11]. De forma generalizada se hace referencia al cambio climático a aquel originado por causas antropogénicas y se describe cómo el aumento de las temperaturas globales desde mediados del siglo XX hasta la actualidad debido al aumento de los GEI derivados de la actividad humana. En 2017, debido al calentamiento antropogénico, la tierra elevó su temperatura media global un 1,0°C más desde la época preindustrial (1850) con un ritmo de crecimiento actual de 0,2°C por decenio. Además, como muestra la Figura 2, considerando la temperatura atmosférica y de los océanos, los 10 años más cálidos de los 143 años de registro han ocurrido desde 2010, y los últimos nueve años (2014-2022) se clasifican como los nueve años más cálidos registrados [12]. Sumado al calentamiento global de la superficie del planeta, el Panel Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) incluye como riesgos derivados del cambio climático episodios de temperaturas extremas y sequías, provocando desertizaciones; fuertes precipitaciones, ciclones tropicales, inundaciones y riadas derivadas de las mismas; disminución del hielo marino aumentando el nivel del mar, cambios en las corrientes y temperaturas marinas y acidificación de los océanos [13][11].

Este hecho provoca cada vez más situaciones de estrés térmico en todas las regiones y hábitats del mundo, impactando en la salud, el confort y el rendimiento energético [14], [15]. Específicamente, las zonas del interior son unas de las más afectadas, ya que no solo experimentan eventos de días calurosos ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$), sino también un aumento de noches tropicales ($T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$) [16], [17]. Además, en la región mediterránea, el número de días de olas de calor por década ha aumentado de 2 a 6,4 [18].

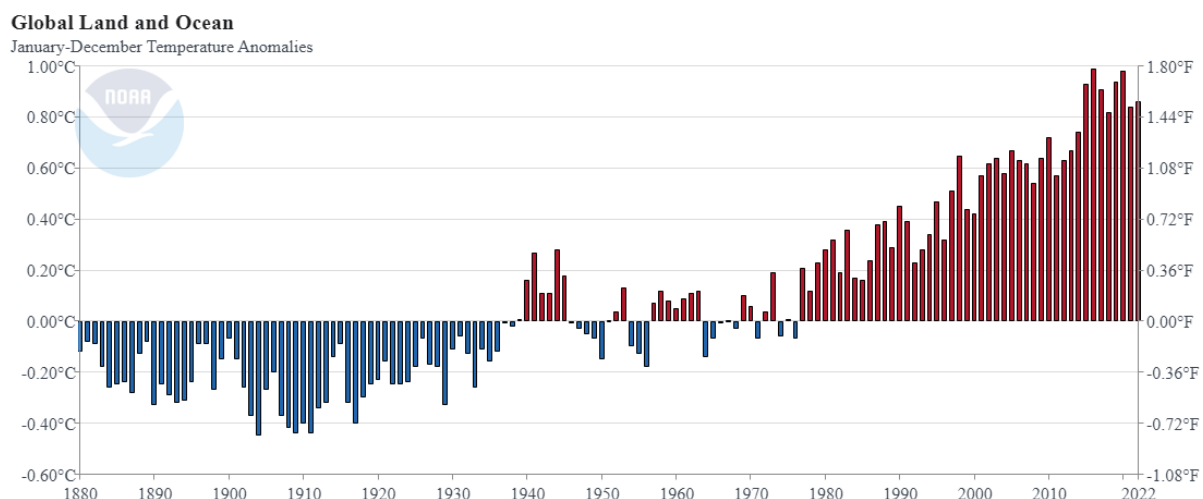


Figura 2. Anomalías de las temperaturas globales en superficie y océanos para la serie de 1880-2022

En España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha analizado los datos climáticos de los últimos 40 años, destacando que, más de 32 millones de personas sufren de manera directa sus consecuencias. Estos hechos se evidencian a través de la expansión de los climas semiáridos, el alargamiento de los

veranos (casi 5 semanas más que a comienzos de los años 80), más días de olas de calor y noches tropicales o el aumento generalizado de la temperatura media del agua y del aire. De hecho, el incremento la temperatura superficial media del Mediterráneo es de 0,34 °C por década [19], mientras que la temperatura del aire media anual ha ascendido 1.57 °C entre 1961 y 2023 en España.

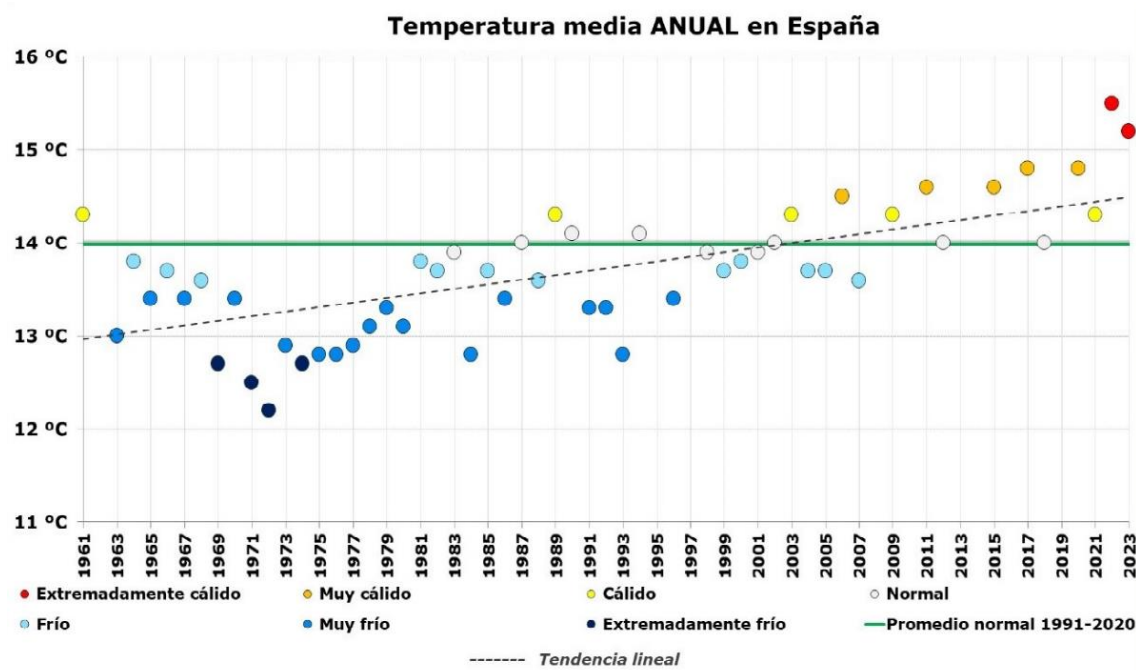


Figura 3. Serie de temperaturas medias anuales y carácter térmico (respecto de la media 1991-2020) en España desde 1961 a 2023. Fuente: AEMET [20]

Microclima urbano

Esta situación climática actual se ve exacerbada en los entornos densamente construidos como las ciudades. El clima predominante del lugar (macroescala) se ve modificado por las condiciones del entorno a nivel local en función de factores naturales como la orografía, la presencia de zonas verdes y de grandes masas de agua, las características del suelo o los perfiles de viento e insolación. Además, en los entornos construidos, debido a factores antropogénicos originados por la sustitución de la capa vegetal por edificaciones y superficies pavimentadas, se generan cambios a nivel micro (microescala). Este fenómeno denominado microclima urbano depende del intercambio energético que se produce entre un punto y las condiciones urbanas del contorno. Se estudia dentro de la capa de dosel de urbano (*Urban Canopy Layer, UCL*), que se corresponde con la capa más baja de la atmósfera y está comprendida entre el nivel de suelo y las cubiertas de los edificios [21]. Es en esta UCL es donde se desarrolla la actividad diaria y donde ocurren la mayoría de las interacciones entre las superficies urbanas y la atmósfera, incluyendo el intercambio de calor, humedad y contaminantes y consecuentemente influye en las relaciones de los ciudadanos con su entorno.

Dicho fenómeno, implica unos valores de temperatura y radiación de onda larga significativamente más altos que en las zonas rurales circundantes, mientras que la humedad y la velocidad del viento se ven reducidas, llevando a olas de calor más prolongadas, intensas y frecuentes [22]. Para cuantificar

este resultado, uno de los efectos más estudiados es el fenómeno de Isla de Calor Urbana (ICU), que se define como la variación de temperatura que sufren los entornos urbanos respecto a la zona rural, especialmente por la noche [23] [24], [25]. Esta modificación climática a nivel micro dependerá de los factores antropogénicos comentados anteriormente, entre los que se incluyen la estructura urbana (dimensiones de los edificios y espacios entre ellos, anchos de calles y áreas abiertas), cobertura urbana (áreas construidas, pavimentadas, con vegetación, suelo desnudo y agua), tejido urbano (construcción y materiales naturales) y metabolismo urbano (calor, agua y contaminantes debido a la actividad humana) [26]. En los últimos períodos de verano, muchas áreas densamente pobladas experimentaron calor récord. De las aproximadamente 10.000 ciudades del mundo, casi la mitad se enfrentó a una tendencia creciente en la exposición al calor entre 1983 y 2016 [27], [28]

Escenarios de cambio climático

Asimismo, en las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático es importante poder considerar no sólo el efecto del clima actual, sino los efectos que tengan en cuenta proyecciones climáticas futuras. En ese sentido el IPCC definió en su quinto informe las Sendas Representativas de Concentración (RCPs, *Representative Concentration Pathways*) [5]. Dichas RCPs se presentaron como trayectorias utilizadas para modelar y proyectar los cambios futuros en el clima, basados en diferentes niveles de emisiones de GEI y otros forzamientos climáticos. Siguiendo esta idea, diferentes estudios apuntan a la necesidad de realizar planes de rehabilitación energética para hacer frente a la creciente demanda de refrigeración y a los riesgos de sobrecalentamiento, que resultan ser más severos para estos escenarios climáticos futuros [29], [30]. En España, se espera que las demandas de calefacción se reduzcan en torno al 50% y 70% en el 2080 considerando los escenarios RCP4.5 Y RCP8.5 respectivamente, mientras que para estas mismas proyecciones las demandas de refrigeración aumentarían hasta los 130% y 180%, exacerbándose esta situación en las zonas de interior, como es el caso de la ciudad de Madrid [31], [32], [33]. Recientemente, el IPCC incluyó en su sexto informe, las sendas socioeconómicas compartidas (SSPs, *Shared Socioeconomic Pathways*), las cuales no sólo se centran en las variaciones climáticas, sino que combinan la evolución del clima con posibles cambios socioeconómicos (variaciones de población, economía, tecnología, política y desarrollo) para explorar cómo estos factores interactúan y afectan a los futuros escenarios de cambio climático inducidos por el hombre [15].

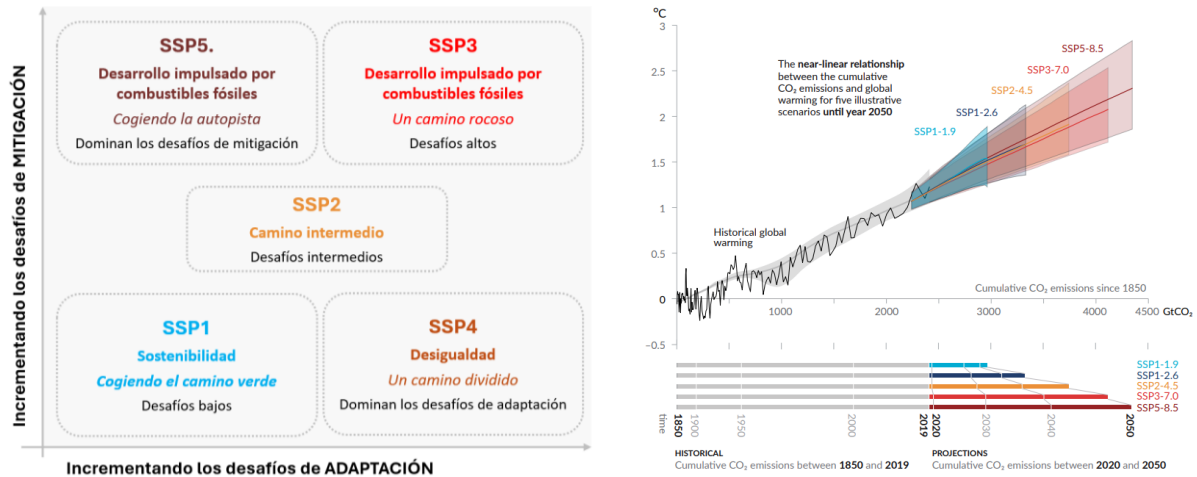


Figura 4. Sendas socioeconómicas compartidas (SSPs, Shared Socioeconomic Pathways) y su relación con el aumento de la temperatura superficial global desde 1850 (°C) en función de las emisiones acumuladas de CO₂ (GtCO₂). Imagen adaptada del [34]

Por otro lado, para cuantificar el impacto que tiene estas tendencias climáticas ahora y sus estimaciones a largo plazo, se utilizan diferentes índices. A nivel climático se evalúan aspectos como las noches tropicales o los días de verano, como destaca la Plataforma Europea de Adaptación al Cambio Climático (Climate-ADAPT) o el proyecto *European Climate Assessment & Dataset* (ECA&D) [35], [36]. Desde el punto de vista urbano esta situación de estrés térmico se puede evaluar con diversos índices de confort térmico exterior [37], mientras que desde el punto de vista edificatorio es frecuente el uso de grados-día para estimar las demandas de calefacción y refrigeración [37].

2.1.2. Características del parque edificatorio

Infraestructura residencial edificada

De acuerdo con el *EU Building Block Observatory* (BSO), cuyo objetivo es proporcionar datos transparentes y fiables sobre el parque inmobiliario de la Unión Europea (UE) para respaldar el seguimiento de las políticas y medidas energéticas, el número de edificios construidos en la UE en 2021 es de 125,90 millones [38]. De esta cantidad, el 91% pertenecen al sector residencial, con un total de 114,35 millones, mientras que sólo el 9% pertenece al sector servicios, siendo esta cifra de 11,55 millones. España ocupa el cuarto puesto en número de edificaciones en Europa con un total de 10,30 millones, lo que implica un 8% del total construido en la UE. De este total, el 85% de edificios son residenciales (Figura 5).

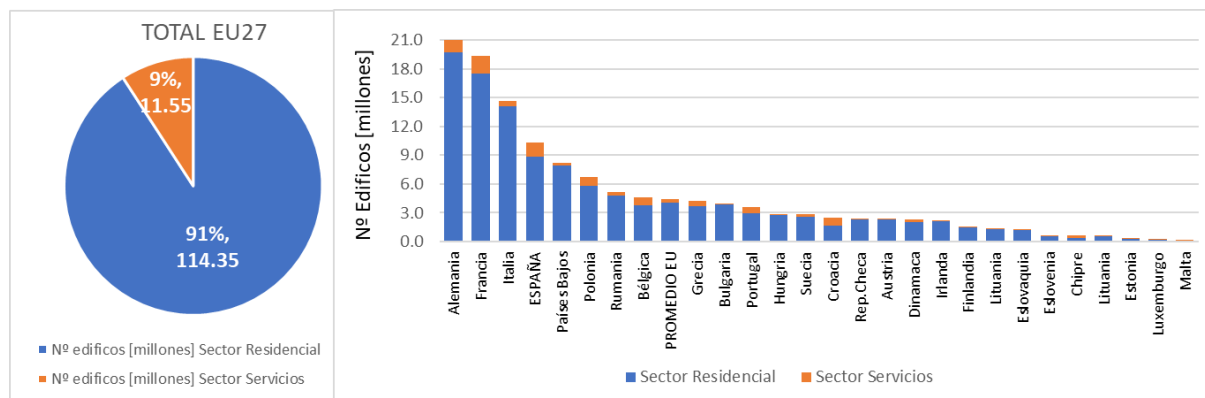


Figura 5. Número de edificios en Europa (EU27) catalogados por sector residencial y servicios. Elaboración propia a partir de BSO (2022) [38].

Como muestra la Figura 6, este número de edificios europeos alberga un total de 208,87 millones de viviendas, de las cuales 22,44 millones están ubicadas en España, una cantidad muy superior a la media de los países de la UE. Estos hogares españoles tienen una superficie útil media de 128 m² frente a los 96 m² de la media europea. Además, el 83% de dichos hogares corresponden a la primera residencia, distribuidas mayoritariamente en viviendas colectivas con un 68%, frente al 32% de las viviendas unifamiliares [38].

Considerando estas primeras residencias, de acuerdo con la Encuesta Continua de Hogares (ECH), en 2020 el número de viviendas construidas en España hasta los años 50 son unos 2 millones, habiendo un equilibrio entre viviendas unifamiliares o casa bajas y bloques colectivos o en altura [39]. Sin embargo, a partir de mediados del siglo XIX comienza un crecimiento exponencial, debido a la reconstrucción del país después de la Guerra Civil (1936-1939) y el éxodo rural, que alcanza su pico en los años 70, donde destacan la privatización en la promoción de dicha vivienda social y su intento de maximizar la construcción. Este hecho generó la primera burbuja inmobiliaria en España, derivada, entre otros, de la crisis del petróleo, lo que supuso una recesión en la construcción de nuevas viviendas en los años 80. En los años 90, comienza la recuperación económica, acompañada de una expansión del crédito, la especulación inmobiliaria y una política de construcción masiva de viviendas, que generalmente copaban los cinturones de las ciudades con viviendas en urbanizaciones en altura para las clases medias y unifamiliares, para las familias de mayor renta. Estas políticas derivan en la segunda burbuja inmobiliaria, que comenzó en el 2008. Este hecho sumado a la reciente crisis sanitaria de la COVID-19 ha supuesto una anotable paralización en la construcción de hogares en los últimos 15 años.

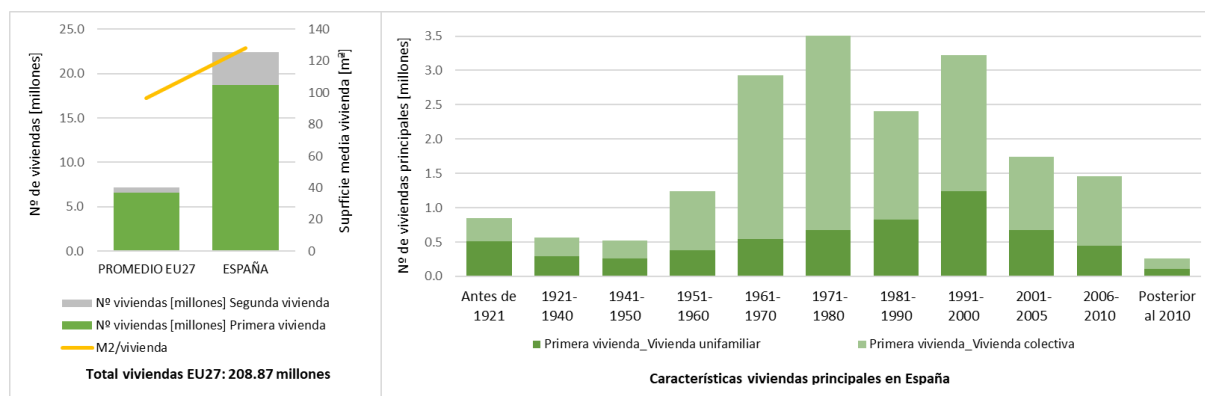


Figura 6. Características de las viviendas en la UE y España. a) Número de viviendas principales, secundarias y superficie media (izquierda). b) Cantidad de viviendas principales catalogados por año y tipología (derecha). Elaboración propia a partir de BSO (2022) y ECH (2020) [38], [39].

Además, a nivel global, las áreas urbanas, pese a ocupar sólo un 3% de la superficie del planeta, albergan al 55% de la población y son responsables del 67% del consumo energético global [40] [41], con previsiones que indican un aumento de la población en las ciudades a un 68% en el 2050 [42]. Como muestra la Figura 7, según la última actualización de Eurostat (2021) de los 742,3 millones de habitantes que viven en Europa, el 38,9 % lo hace en grandes ciudades, el 35,9% vive en ciudades o periferias, mientras que sólo una cuarta parte de la población vive en zonas rurales (25,2 %) [43]. En España, la densidad de urbanización es mucho más elevada, ya que más de la mitad de las viviendas principales se encuentran ubicadas en grandes ciudades (54%), un tercio lo hace en ciudades o periferias (33%), mientras que sólo un 13% de las primeras residencias están en zonas rurales [39].

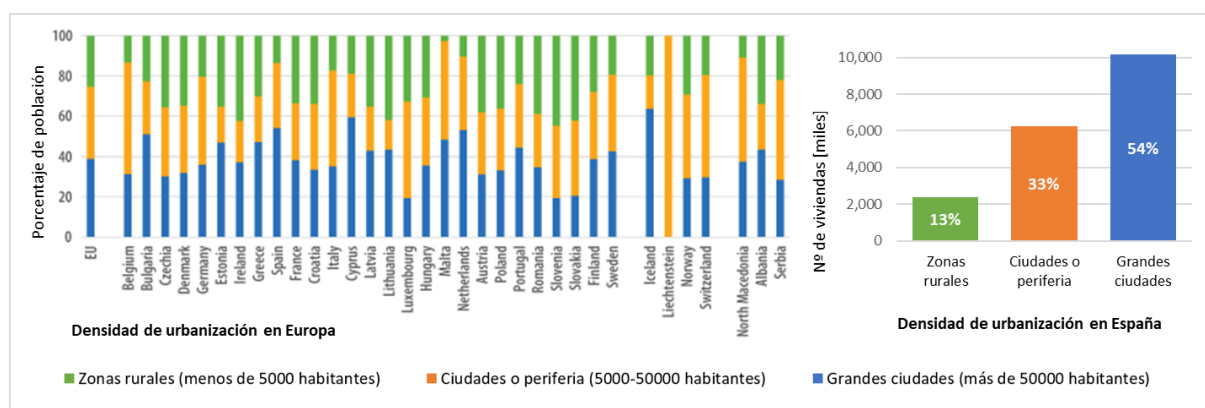


Figura 7. Densidad de urbanización. a) Población en Europa en 2021 (izquierda). b) Cantidad de viviendas principales en España en 2020 (derecha). Elaboración propia a partir de Eurostat y ECH [39], [43].

Consumo energético edificatorio

Por otro lado, como muestra la Figura 8, el BSO destaca que, desde el punto de vista del consumo energético, del total del consumo de energía final de la UE, el 42 % pertenece a la edificación. De esta cifra, la mayoría está destinada al sector residencial, con un 28% del total, mientras que sólo un 14% pertenece al sector servicios. Esto implica anualmente en la UE un consumo de energía total final en edificios residenciales de 10.942 PJ/año y unas emisiones totales de GEI (directas e indirectas)

asociadas al sector residencial de 587 MtCO₂eq/año. En España estas cifras son muy superiores al promedio europeo, de 617 PJ/año y de 28 MtCO₂eq/año respectivamente.

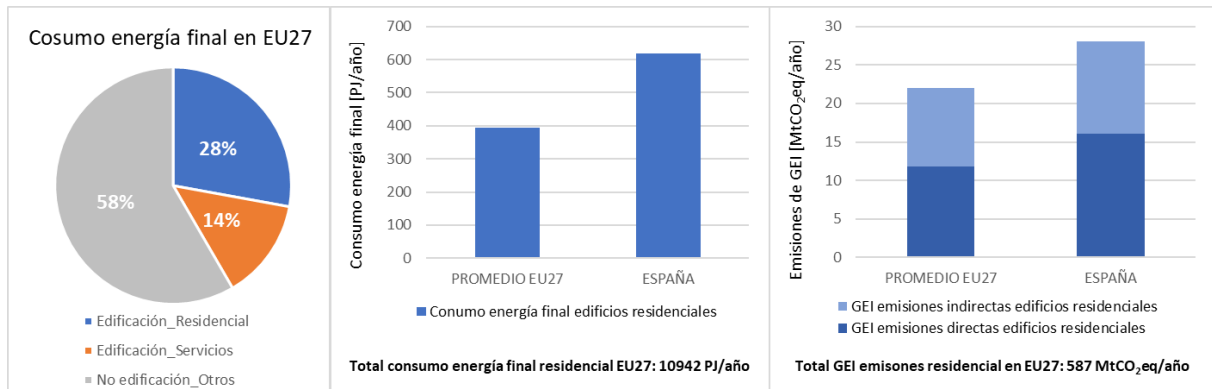


Figura 8. Consumo de energía final. a) Consumo por sector en la UE en 2021 (izquierda). b) Comparación del consumo en Europa y España en PJ/año en 2021 (centro). Comparación de emisiones de GEI en Europa y España en MtCO₂eq/año en 2021 (derecha). Elaboración propia a partir de BSO [38].

La Figura 9, desgrega la información previa, utilizando los datos para el año 2022 proporcionados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en su informe de consumo por usos y tipo de energía del sector residencial en España [44]. El consumo de calefacción es el mayoritario, seguido del de los electrodomésticos y el agua caliente sanitaria (ACS), con valores del 39%, 27% y 19% respectivamente, mientras que el aire acondicionado sólo implica un 1% del consumo por el tipo de aplicación. Por otro lado, la fuente de energía más común es claramente la electricidad con un 44%, a la que le sigue el gas natural con un 22%. Los productos derivados del petróleo (gasóleo y GLP) y las energías renovables (biomasa, solar térmica y calor ambiente) se encuentran en último lugar sumando en ambos casos un 17% del suministro de energía residencial. Combinando los factores por aplicación y tipo de energía, se observa que las fuentes de calefacción más comunes son el gas natural, el gasóleo y la biomasa, en proporciones similares. Aproximadamente la mitad de los hogares usan gas natural para el suministro de ACS, mientras que para la cocina la fuente de suministro es la electricidad, superando este 50%. Finalmente, también la electricidad es la única fuente de suministro de energía para electrodomésticos, iluminación y aire acondicionado.

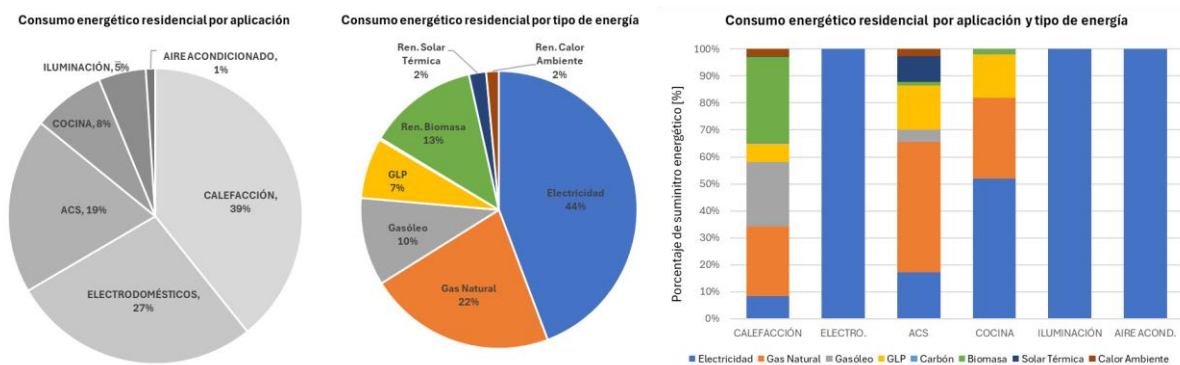


Figura 9. Consumo por usos y tipo de energía del sector residencial en España en 2022. Elaboración propia a partir del IDAE [44]

En este sentido, es importante señalar, que, siguiendo los valores de la BSO el precio medio de la energía en la UE ha aumentado aproximadamente un 30% en los últimos años (2017-2022), hasta llegar a los 0,253 €/kWh y 0,086 €/kWh en 2022 para la electricidad y el gas natural respectivamente. En España este incremento ha sido en torno al 35%, alcanzando valores de 0,307 €/kWh para la electricidad y 0,090 €/kWh para el gas natural [45].

Por otro lado, cabe destacar el incremento de la dependencia energética de terceros países en la Unión Europea (EU), donde el 60% de la energía consumida es importada. Dentro del sector residencial, el gas natural es el tipo de energía que más frágil se presenta a posibles interrupciones en el comercio internacional. Este hecho se debe a su difícil sustitución, su concentración en pocos proveedores, y su grado de importación. En concreto, en España este porcentaje de dependencia energética aumenta hasta el 70%, pese a que presenta una mayor diversificación de proveedores. A esta situación se une la alteración que ha supuesto la situación geopolítica de la guerra de Ucrania, ya que Rusia ha dejado de ser el principal proveedor de productos energéticos para la UE [46].

2.1.3. Características poblacionales

Estas nuevas tendencias climáticas implican un cambio en los patrones de consumo a nivel energético, generando un claro aumento de las demandas de refrigeración [47], [48]. De hecho, en Europa, la implantación de sistemas para la refrigeración de espacios se caracteriza por un alto potencial de crecimiento, especialmente el destinado a los hogares. Este patrón, puede estar afectando a la sobrecarga de un sistema eléctrico poco predecible debido a varios factores entre los que se incluyen las nuevas tendencias climáticas o la movilidad eléctrica [49], [50], [51]. Por otro lado, estos impactos climáticos van más allá de la mera consideración de las demandas energéticas de los edificios; abarcan amplios aspectos relacionados con la salud mental y física de las personas [14], [15], [52]. Esto afecta desproporcionadamente a la población más vulnerable como ancianos, personas con enfermedades crónicas o mentales, grupos socioeconómicos de bajos recursos y los trabajadores que realizan tareas manuales o físicas [53], [54].

Además, la implantación masiva de dichos sistemas de refrigeración, aparte de no ser soluciones accesibles para la población con bajos recursos, implican también un aumento de la temperatura ambiente, debido a sus sistemas de condensación exterior. Adicionalmente, esta situación también podría implicar una mayor emisión de GEI, si la energía proviene de fuentes no renovables, perpetuando el ciclo de cambio climático [55]. La combinación de altas temperaturas y mayores niveles de contaminantes del aire como el ozono o las PM10, que se encuentran comúnmente en las zonas urbanas, amplifica aún más los riesgos asociados con el estrés por calor durante las estaciones cálidas [56], [57].

Desigualdad energética

Consecuentemente, evaluar el estado energético de los hogares y la situación de sus habitantes es clave a la hora de anteponer medidas de rehabilitación energética que se ajuste a las necesidades

reales de la población. Estos factores están altamente relacionados con el concepto de pobreza energética, cuyo origen se produce por la incapacidad de mantener un hogar en condiciones de confort adecuadas para los estándares actuales y disponer de los servicios energéticos necesarios por un precio razonable. Relacionado con este concepto, cabe destacar que, según Eurostat, el poder adquisitivo (PPS) de los hogares europeos es de 18.706 PPS, siendo en España un valor de 17.254 PPS, inferior a la media de la UE. Más en detalle, la Figura 10 estudia la capacidad de alcanzar unos mínimos de confort en las viviendas en Europa y España considerando las características diversos factores socioeconómicos. Para ello, se ha utilizado el concepto de riesgo de pobreza o en riesgo de exclusión social (*at risk of poverty or social exclusion, AROPE*), detallado en las estadísticas proporcionadas por la encuesta sobre ingresos y condiciones de vida de la EU (*EU statistics on income and living conditions, EU-SILC*), como factor que podrían limitar el confort en sus viviendas [58]. El indicador AROPE considera que una persona está en esta situación cuando se dan alguno de las siguientes condiciones: riesgo de pobreza (60% de la mediana del ingreso equivalente), privación material y baja intensidad laboral. En la Figura 10a se observa que el 21% de la población de la UE está en riesgo de pobreza o exclusión social, incrementándose este valor en el caso de España, el cual afecta a más de un cuarto de la población. Además, estos valores se exacerban en el caso de las mujeres, llegando a cifras del 22% y 28% de la población para la UE y España respectivamente. Como posibles limitantes del confort en el interior de los edificios se han considerado el retraso en el pago de facturas, los hogares poco iluminados (viviendas demasiado oscuras), insuficientemente cálidos (incapacidad de mantener la casa adecuadamente cálida) y viviendas con envolvente inadecuada (viviendas con goteras en el techo, paredes, pisos o cimientos húmedos o podredumbre en los marcos de las ventanas). La Figura 10b. desagrega estos datos considerando la población en riesgo de pobreza o exclusión social. Los valores de atrasos en los pagos, una inadecuada iluminación, insuficiente calidez y envolvente inadecuada afecta al 7%, 7%, 8% y 14% de la población europea respectivamente. Estas cifras son claramente superiores en España, y se exacerban notablemente para todos los casos en la población de riesgo. Este análisis destaca que, de la población española en riesgo, más del 20% tiene problemas para pagar sus facturas y viven en viviendas indeficientemente cálidas, siendo estos valores incluso más pronunciados si analizamos la calidad de la envolvente, ya que casi el 30% de los hogares españoles tiene una envolvente inadecuada.

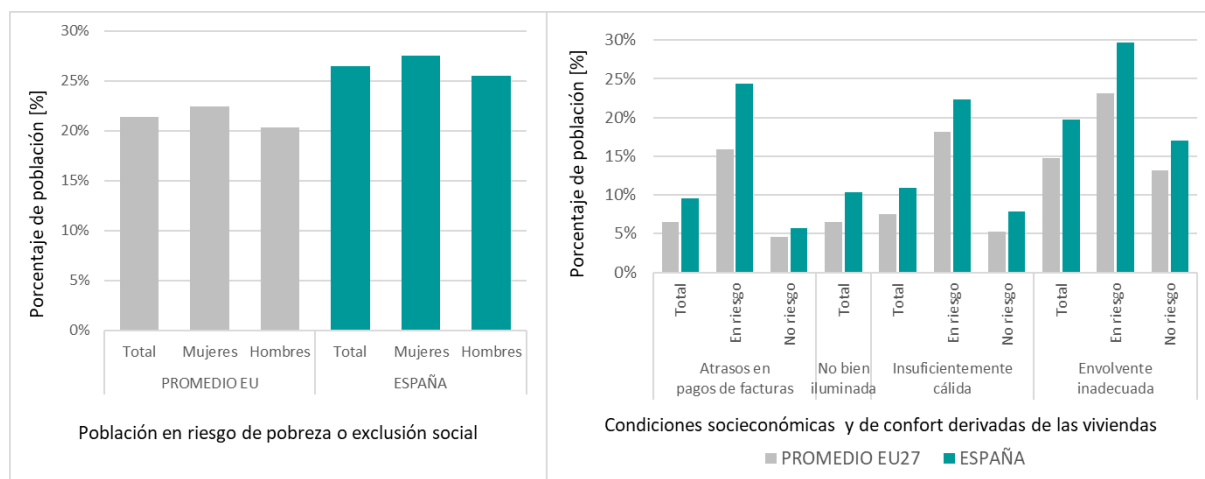


Figura 10. Condiciones socioeconómicas de la población en la UE y España. a) Porcentaje de riesgo de pobreza o exclusión social en el año 2024. b) Porcentaje de población con inconvenientes para conseguir unos mínimos de habitabilidad en el año 2020. Elaboración propia a partir de EU-SILC y BSO [38] [58].

Merece la pena señalar que tradicionalmente el concepto de pobreza energética ha estado vinculado al periodo invernal y es difícil encontrar información sobre las condiciones de refrigeración de los hogares. Sin embargo, el cambio climático y sus recientes situaciones extremas de olas de calor, que también han impactado fuertemente en el norte de Europa, han levantado una mayor concienciación en este aspecto, especialmente en las ciudades por el efecto del microclima urbano. Se estima que en Europa el 19% de los hogares tienen problemas para hacer frente al fenómeno de pobreza energética en verano [59]. En España, debido a su climatología y condiciones de las viviendas, podría incrementarse esa cifra. Por ejemplo, se calcula que en Madrid el número de habitantes afectados por la pobreza energética en verano duplica el valor de Londres [60].

Impacto en la salud

Hacer frente a estas condiciones de inhabilitad en las viviendas tanto en verano como en invierno, impacta en las condiciones de salud de los habitantes. En concreto, la morbilidad y la mortalidad asociada al estrés térmico ha sido ampliamente estudiado.

Las olas de calor son los fenómenos meteorológicos extremos con mayor impacto en términos de número de muertes atribuibles, y las proyecciones de cambio climático esperan que estos escenarios aceleren el ritmo actual de emisiones de GEI a la atmósfera [61]. La urgencia de abordar esta situación es subrayada por el IPCC, que destaca entre los riesgos clave para Europa el estrés y mortalidad de las personas debido al aumento de las temperaturas y los extremos térmicos [7]. De hecho, durante el verano del 2022 se estimaron 61.672 muertes en Europa relacionadas con el calor, de las cuales 11.324 fueron en España [62]. Los efectos directos del calor pueden ser desde leves, como el estrés por calor, hasta mortales, como consecuencia del agotamiento por calor o el golpe de calor. Generalmente los efectos se producen principalmente el mismo día de la exposición, pero se pueden alargar hasta los tres días posteriores. También, indirectamente estas situaciones contribuyen a muertes prematuras

agudizando las enfermedades preexistentes como las relacionadas con problemas cardiovasculares, respiratorios, renales o trastornos electrolíticos [63].

Pese al aumento generalizado de las temperaturas globalmente, hoy en día en Europa, el porcentaje de muertes atribuidas al frío respecto al total de fallecimientos suponen un 8,1% frente al 2,2% para el caso de las muertes asociadas al calor [64]. Cabe destacar que, como consecuencia del cambio climático, se pronostica un incremento también de las olas de frío, que son difíciles de identificar en modelos que no consideran la escala sinóptica. En estos casos, los pronósticos podrían estar infravalorando la potencial reducción de mortalidad y morbilidad asociada al frío [65]. Los efectos de causalidad asociados al frío se relacionan principalmente con cuadros de hipotermia que pueden terminar en paro cardíaco por shock hipotérmico [66]. Sin embargo, en esta ocasión, los efectos están más difuminados en el tiempo, por lo que son más difíciles de identificar. Por otro lado, las bajas temperaturas también son un factor desencadenante de ciertas enfermedades, que pueden contribuir al agravamiento de enfermedades crónicas como las cardiovasculares o respiratorias, como consecuencia del incremento de enfermedades de tipo infecciosa como la gripe o infecciones del tracto respiratorio [67].

Otras variables meteorológicas como la humedad o velocidad del viento también pueden aumentar la sensación de malestar térmico. En latitudes como la española, un nivel de humedad bajo está relacionado con un aumento de la morbilidad por deshidratación y un bajo régimen de vientos también aumenta la sensación de estrés térmico asociado al calor. Además, la baja velocidad de viento está vinculada con una mayor contaminación atmosférica [68]. En ciudades con climas predominantemente anticiclónicos, como Madrid, la combinación de frío intenso, producido por una situación de inversión térmica y contaminación atmosférica alta favorecen la mortalidad por causas respiratorias y circulatorias. Por último, la alta presión atmosférica se ha relacionado con enfermedades cerebrovasculares y neumotórax [69].

Pese a la conocida causalidad entre las altas temperaturas y salud urbana, no fue hasta el año 2003, en el que las olas de calor durante este verano produjeron en Europa la muerte de 70.000 personas, 6.600 en España, cuando se incluyó como un problema de salud pública. A partir de este momento se implementaron planes de prevención del calor y otras estrategias de adaptación. Por ejemplo, en España se definieron temperaturas límites a partir de las cuales se disparan las muertes asociadas al estrés térmico por calor con el fin de crear avisos a la población [70] [71]. Esta concienciación hizo hincapié en identificar y proteger a las poblaciones en riesgo en todo el continente y especialmente a las más vulnerables [72]. Entre los principales grupos de vulnerabilidad se encuentran los adultos mayores, fisiológicamente más susceptibles al clima extremo, aquellos con enfermedades cardiovasculares y respiratorias preexistentes, mujeres tanto por su respuesta física como condiciones socioeconómicas, personas socialmente aisladas o socioeconómicamente desfavorecidas, así como trabajadores con actividades exteriores [62], [73], [74], [75], [76], [77].

Además del de riesgo de pobreza o en riesgo social (ARPE) indicado anteriormente, con el fin de cuantificar la cantidad de población vulnerable al estrés térmico, la Figura 11 muestra las características demográficas y del estado de salud de la población de la UE y española.

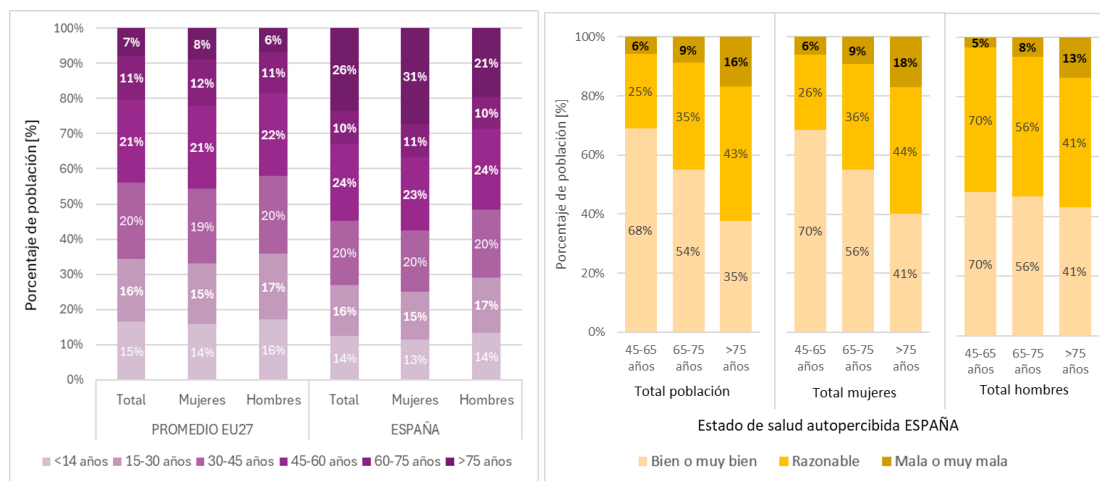


Figura 11. Condiciones de la población en la UE y España. a) Porcentaje de cantidad de población según su rango de edad y sexo en 2024. b) Porcentaje de población en función de sus condiciones autopercebida de salud en 2023. Elaboración propia a partir de Eurostat [45].

Finalmente, cabe destacar que, aunque hay evidencia que los planes de prevención del calor, incluidas las estrategias de preparación y respuesta, las acciones de intervención y los sistemas de alerta temprana contra el calor y la salud, pueden reducir la carga sanitaria de las temperaturas ambientales, su eficacia aún es limitada. Entre los factores clave que pueden estar limitando esta eficacia, destaca su condición multifactorial que agrupa factores ambientales (entorno) y personales (respuesta humana).

2.2. Objetivos y políticas de rehabilitación energética

Ante las características climáticas, edificatorias y poblacionales presentadas anteriormente, la rehabilitación energética del parque edificatorio se ha consolidado como una pieza clave en la estrategia europea de descarbonización y resiliencia, con el fin de combatir el cambio climático, reducir la dependencia energética, reactivar la economía y luchar contra la desigualdad. La rehabilitación energética de los edificios existentes emerge como una herramienta fundamental para alcanzar los objetivos de descarbonización y sostenibilidad. Esta estrategia se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), especialmente con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima) [5].

Más allá de la reducción de emisiones de GEI, la rehabilitación energética se integra en un enfoque holístico de la regeneración urbana sostenible. La mejora de la eficiencia energética de los edificios, combinada con otras medidas de rehabilitación contribuye en los siguientes aspectos:

- **Mejorar la calidad de vida de los residentes:** creando espacios más saludables, confortables y accesibles, mejorando la calidad del aire interior y reduciendo el ruido.
- **Revitalizar barrios degradados:** aumentando el valor de las viviendas, atrayendo nuevas inversiones, mejorando la estética urbana y fomentando la cohesión social.
- **Reducir la pobreza energética:** haciendo las viviendas más eficientes y resilientes, contribuyendo a un menor gasto energético de las familias y mejorando su salud y bienestar.
- **Generar empleo:** impulsando la creación de empleo local en sectores como la construcción, la instalación de equipos y la producción de materiales de construcción sostenibles.

2.2.1. Evolución del marco regulatorio europeo.

Europa recoge por primera vez de manera explícita la mejora del medio ambiente en el Acta Única Europea en 1987, mientras que la reducción del consumo de energía y la mejora en su eficiencia comenzaron a ganar relevancia con el Tratado de Maastricht en 1992, que formalmente creó la Unión Europea [78]. A partir de este año se han ido definiendo una serie de objetivos relacionados con las actuales estrategias de rehabilitación energética.

Inicios de las Bases Regulatorias para la Eficiencia Energética en la UE

A principios de los 2000 se acentúa la creciente preocupación por el cambio climático, originada en gran parte por la constatación de su evidencia científica a raíz de la publicación del segundo informe del IPCC y el **Protocolo de Kioto de 1997**. Éste último establecía como objetivos vinculantes para los países desarrollados una reducción de GEI en conjunto en un 5,2% para el primer periodo (2008-2012), respecto a los valores de 1990 ó 1995 (dependiendo del gas), siendo para el caso concreto de Europa un 8% [79], [80]. El sector de la edificación, responsable en ese momento del 40% del consumo total de energía, se identificó como un sector con potencial de ahorro energético. La adopción de tecnologías más eficientes en la edificación, podían reducir significativamente el consumo de energía sin comprometer el confort y la calidad de vida de los usuarios y disminuir la dependencia energética de países externos, al tiempo que se buscaba promover el desarrollo económico y social y la armonización del mercado interior.

Ante este escenario en 2002 con la **Directiva 2002/91/CE** se aprueba la primera regulación europea sobre la eficiencia energética de los edificios [81]. Esta norma, pionera en su momento, marcó un punto de inflexión al introducir la certificación energética de los edificios como instrumento para informar a los ciudadanos sobre el consumo energético de las viviendas y para incentivar y concienciar en la construcción y rehabilitación de edificios más eficientes. Posteriormente, la **Directiva 2006/32/CE** sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos supuso un paso importante para incentivar las mejoras en la eficiencia energética de los sectores industriales y domésticos [82]. Los Estados miembros se proponían alcanzar un objetivo de ahorro energético del 9 % para el noveno año de aplicación de la presente Directiva. Esta norma promovió la creación de Planes de Acción para

la Eficiencia Energética (PAEE) en cada uno de Estados miembros, que les permitieran a los establecer objetivos mediante una hoja de ruta integral para lograr los objetivos de ahorro energético en la UE.

Objetivos 2020. Paquete de Energía y Cambio Climático 20-20-20

En 2009 se aprueba el paquete de medidas sobre clima y energía, con el objetivo de garantizar que la UE cumple sus ambiciosos objetivos en materia de clima y energía para 2020, enfocado en tres objetivos fundamentales [83]. Reducir el 20 % de las emisiones de GEI en relación con los niveles de 1990, mejorar en un 20% la eficiencia energética de la UE e incorporar un 20% de energías renovables en la UE (eólica, solar, biomasa, etc.) para el año 2020.

Basado en esta hoja de ruta, surge en el año 2010 la **Directiva 2010/31/UE** sobre el rendimiento energético de los edificios (EPBD) [84]. Dicha norma estableció requisitos de eficiencia energética más ambiciosos para edificios nuevos y existentes, con el fin de descarbonizar el parque edificatorio para 2050 e insta a los Estados miembros a desarrollar estrategias de rehabilitación a largo plazo. Además, introdujo el concepto de "Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo" (nZEB), obligatorio para edificios públicos nuevos desde 2020 y para todos los edificios nuevos (públicos y privados) desde 2021, con un consumo energético muy bajo cubierto por fuentes renovables. Se promovió la rehabilitación energética de edificios existentes, especialmente públicos, y fomentó el uso de energías renovables. La directiva también exigía la certificación energética de los edificios y la realización de inspecciones regulares a las instalaciones de calefacción y aire acondicionado. El Plan de Eficiencia Energética de 2011 actualizó estos compromisos, enfatizando la necesidad de actuaciones más profundas y ambiciosas en la rehabilitación energética de edificios con el fin de cumplir la estrategia "20-20-20", enmarcada en la Estrategia Europa 2020 que incluía la hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica en 2050 [85].

La Directiva 2012/27/UE sobre eficiencia energética consolidó las normativas anteriores derogando, entre otras, la 2006/32/CE y estableciendo un marco más sólido para alcanzar los objetivos de ahorro energético de la UE para 2020 [86]. Esta directiva obligaba a los Estados miembros a realizar renovaciones anuales en al menos el 3 % de la superficie de los edificios gubernamentales, se define el objetivo de al menos un 80 % de los consumidores disponen de sistemas de medición inteligentes en 2020. Además, se obliga a la incorporación de auditorías energéticas regulares para las grandes empresas, además de otros mecanismos que incentivaran la rehabilitación energética en todo tipo de construcciones.

Objetivos 2030. Paquete de energía limpia para todos los europeos

En el 2015, se adoptó el **Acuerdo de París**, tratado internacional que recoge por primera vez el objetivo de mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales, y hacer esfuerzos para tratar de limitar el calentamiento global a 1,5°C [87]. En este contexto internacional, también en 2015 se desarrolla la **Agenda 2030 y los ODSs** [88]. Ante este escenario la UE revisó su marco de política energética en 2015 proponiendo un nuevo conjunto de normas energéticas, llamado "paquete Energía limpia para todos los europeos la EU", fijando como

objetivos a corto plazo (2030) la reducción del 40% de GEI e incrementando un 32% las energías renovables y un 32,5% la eficiencia energética. Además, la perspectiva a largo plazo, pretende descarbonizar completamente el parque inmobiliario en 2050.

Para cumplir estos objetivos, dentro de las competencias edificatorias, la 2010/31/UE y la 2012/27/UE es modificada por la nueva **Directiva 2018/844** en 2018 [89]. Este marco regulatorio introduce requisitos adicionales para mejorar la eficiencia energética de los edificios existentes. Además, se fomentó la inversión en tecnologías de energías renovables y sistemas de calefacción y refrigeración eficientes, que incluyen contabilizar los consumos de calefacción de forma individualizada. Además, las directivas 2018/2002/UE y la 2018/2001/UE complementan los objetivos planteados en materia de eficiencia energética y energía procedente de fuentes renovables [90], [91].

Objetivos 2050. Pacto Verde Europeo

En 2019 el Consejo Europeo acuerda **el Pacto Verde (*Green Deal*)**, vigente hoy en día y cuyo objetivo es situar a la UE en el camino hacia una transición ecológica, actualiza el objetivo de reducir al menos en un 55% los GEI para el 2030 y en última instancia reducir completamente los GEI en 2050, haciendo a Europa el primer continente climáticamente neutro [92]. Supone la base para la transformación de la UE en una sociedad equitativa y próspera con una economía moderna y competitiva, considerando iniciativas que abarcan el clima, el medio ambiente, la energía, el transporte, la industria, la agricultura y las finanzas sostenibles, todas ellas estrechamente relacionadas.

Dentro de este plan destaca el Objetivo 55 aprobado en 2021 (*Fit for 55*), que pretende revisar y proponer medidas legislativas para llegar a los objetivos 2050, como la prohibición de la venta de vehículos de combustión interna a partir de 2035 para descarbonizar el transporte por carretera [93]. También en 2021, la UE adoptó su primera Ley Europea del Clima, que estableció de forma inamovible los objetivos definidos en el Pacto Verde de Europa [94]. Asimismo, la Comisión Europea recomendó, en febrero de 2024, un objetivo intermedio adicional de reducir un 90 % las emisiones de aquí a 2040. Por otro lado, enmarcado dentro de este objetivo destaca la Directiva 2022/362/UE sobre fuentes renovables, que fija un nuevo objetivo del 40% de energía renovable para 2030. El Reglamento sobre el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (2023) introdujo un impuesto al carbono a las importaciones de productos con altas emisiones GEI [95].

En el año 2020 se propone la estrategia Oleada de Renovación (*Renoavation Wave*), que busca rehabilitar al menos 35 millones de edificios antes de 2030, con el objetivo final de alcanzar la neutralidad climática para 2050 [3]. Se enfoca principalmente en mejorar el aislamiento, la eficiencia en calefacción y refrigeración, y la integración de energías renovables en edificios existentes. Además, fomenta la creación de empleos en el sector de la construcción y la modernización de viviendas para ofrecer mejores condiciones de vida. Asociada a esta iniciativa, la Nueva Bauhaus busca inspirar soluciones innovadoras que impulsen la rehabilitación de edificios y áreas urbanas bajo principios de sostenibilidad estética y funcionalidad [96]. Finalmente, se organiza la alianza *BuiltUp* que promueve la investigación e innovación en el sector de la construcción y los entornos urbanos [97]. El objetivo es

acelerar la adopción de tecnologías innovadoras y sostenibles en la construcción, con énfasis en la creación de edificios eficientes desde el punto de vista energético, cómodos y saludables.

Complementando al Pacto Verde, en 2020 se aprueban los fondos *NextGenerationEU*, un esfuerzo significativo de la UE para enfrentar los desafíos económicos y sociales surgidos a raíz de la pandemia de la COVID-19 [98]. Este plan no solo busca la recuperación económica, sino también una transición hacia un modelo más sostenible y resiliente. A través de este mecanismo, se financian diversas iniciativas que abarcan la digitalización, la sostenibilidad y la cohesión social, alineándose con los objetivos del Pacto Verde Europeo. Por otro lado, los fondos *REPowerEU* aprobados en 2022, fueron presentados recientemente, como una respuesta a la creciente dependencia energética a los combustibles fósiles y a la necesidad urgente de diversificar las fuentes de energía en el contexto de la crisis provocada por la invasión rusa de Ucrania [99]. Este plan tiene como objetivo acelerar la transición hacia una economía energética más limpia y reducir la dependencia de las importaciones de energía.

Finalmente, la actual **Directiva EPBD 2024/1275**, refunde los textos anteriores en materia de eficiencia energética de los edificios [100]. Algunos de los puntos clave incluyen la renovación de al menos el 43% de los edificios existentes, especialmente aquellos con peor rendimiento, exigiendo una reducción en el consumo de energía primaria comparado con el 2020 del 16% para edificios residenciales en el año 2030 y del 20-22% en el año 2035. Cabe señalar el hincapié en establecer medidas financieras adecuadas especialmente para hogares vulnerables y a las personas afectadas por la pobreza energética, para llegar a estos objetivos. Además, esta directiva promueve el uso de energía renovable en edificios, como la instalación de paneles solares, se introduce el concepto de "pasaporte de renovación" y se incluye el cálculo del potencial de calentamiento global (PCG).

2.2.2. Evolución del marco regulatorio español.

La normativa española relacionada con la rehabilitación energética en los últimos años ha estado vinculada a las directivas e iniciativas europeas mencionadas anteriormente.

Inicios de la Eficiencia Energética.

La transposición de la directiva 2002/91/UE en España implica la modificación o implantación de diferentes iniciativas, entre las que destacan:

- La primera Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4). Este plan, definido en 2003, tiene como principal objetivo la reducción de los índices de intensidad energética, siendo la edificación como uno de los sectores clave [101]. Esta estrategia se basa en garantizar el suministro de energía, mejorar la competitividad mediante la utilización eficiente de recursos y fomentar la protección del medio ambiente mediante Planes de Acción para el periodo 2005-2007 y 2008-2012.
- Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado en 2006 con el RD 324/2006, sustituye a las anteriores Normas Básicas de la Edificación (NBE) [102], [103]. El nuevo documento establece los

requisitos básicos que deben cumplir los edificios en materia de eficiencia energética en nuevas construcciones y grandes reformas (superficie útil mayor de 1.000 m² y más del 25% de renovación de cerramientos). Entre los aspectos clave se encuentran las exigencias mínimas de eficiencia energética y los requisitos específicos para la integración de energías renovables.

- Actualización del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) en 2007 con el RD 1027/2007 [104]. Modifica el documento anterior (RD 1751/1998), introduciendo una gran actualización para mejorar la eficiencia energética y medidas para reducir el consumo de energía en las instalaciones térmicas, además incorporó la obligatoriedad de inspecciones periódicas y mantenimiento preventivo.
- Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción, aprobado en 2007 con el RD 47/2007 [105]. Este fue el primer marco normativo para evaluar la eficiencia energética en el país. A través de un sistema de clasificación y una metodología de cálculo específica, buscaba fomentar la construcción de edificios más eficientes y sostenibles. Para ello, se desarrollan las herramientas de calificación y certificación LIDER, CALENER VYP y GT.

Objetivos 2020.

Posteriormente, de acuerdo con la Directiva 2006/32/UE, España da continuidad al plan estratégico de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012 (E4), con el segundo Plan Nacional de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2001-2020 (PNAEE) [106], [107]. La planificación en materia energética especifica dos periodos (2016 y 2020) y los desagrega por sectores, entre los que se incluyen la edificación y equipamiento.

Además, la Directiva 2010/31/UE, refunde la anterior 2002/91/UE, obligando a la actualización de los documentos anteriores mediante las siguientes modificaciones:

- El CTE se actualiza en 2013 mediante la Orden FOM/1635/2013. Se introducen exigencias también para los edificios reformados, sin límites de superficies [108]. Se incorpora una nueva sección, el HE0, que limita expresamente el consumo de energía primaria no renovable de los edificios (calefacción y refrigeración). Además, se aumentan las exigencias térmicas de los cerramientos y puentes térmicos.
- El RITE también se actualiza mediante el RD 1826/2009 y posteriormente en 2013 con el RD 238/2013, para mejorar la eficiencia energética en los edificios, estableciendo nuevos límites para la temperatura de calefacción y refrigeración en los edificios públicos y privados y buscando energías renovables y tecnologías más eficientes en las instalaciones térmicas [109], [110].
- El reglamento de certificación energética de edificios aprobado en 2007 se modifica por el nuevo RD 235/2013 en 2013 [111]. Este documento introduce la certificación también en edificios existentes, se estandariza el contenido del certificado y se potencia la sensibilización, control y verificación. Además, se establece la validación de herramientas de certificación simplificadas, facilitando el cálculo a través de softwares como el CE3X o el Ce3 y mejora de la existente con el software HULC [112].

Por otro lado, la Ley 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas (Ley de las 3Rs), busca transformar y revitalizar el patrimonio edificado y las áreas urbanas en España, promueve la participación ciudadana y establece incentivos para facilitar la implementación de estas acciones, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida en las ciudades [113]. Adicionalmente, se incluye el Informe de Evaluación del Edificio (IEE) para garantizar la conservación, accesibilidad y eficiencia energética de las construcciones de más de 50 años.

Dentro de este horizonte 2020 y de acuerdo con la Directiva 2012/27 UE, en España se definen:

- El Plan Nacional de Acción y Ahorro en Eficiencia energética 2014-2020 en 2014 y su posterior Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020 en 2017 [114]. Estos planes son obligatorios cada tres años, estableciéndose en este último como objetivo la reducción de un 25% de la energía primaria consumida respecto a la tendencia del 2017.
- La Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE) definida originalmente en 2014 y actualizada como marca la directiva en 2017, aportando un análisis más detallado del parque edificatorio español y con medidas más detalladas [115].

Objetivos 2030 y 2050

Con el fin de alcanzar los objetivos definidos 2030 y 2050 definidos por Europa en materia de rehabilitación energética, marcados en gran parte por la Directiva 2018/844 y la reciente 2024/1275, España actualizó y llevó a cabo las siguientes modificaciones:

- El CTE se actualiza en 2019 con el RD732/2019 con el fin de adaptar la normativa a los edificios nZEB, así como mejorar otros aspectos relacionados con la salubridad y la seguridad de los edificios [116]. En 2022 se modificó de nuevo el CTE con el RD 450/2002, que refuerza las exigencias de eficiencia energética, ampliando las normativas sobre protección frente al gas radón y fomentando un enfoque hacia la sostenibilidad y la economía circular [117].
- EL RITE se actualiza en 2021 mediante el RD 178/2021, incluyendo requisitos más estrictos, coeficientes de rendimiento más altos, mayor cobertura de las energías renovables, aumento de la monitorización y fomento del uso de materiales sostenibles y gestión de residuos [118].
- La normativa de certificación de eficiencia energética de los edificios se modifica con el RD 390/2021 [119]. Las principales modificaciones incluyen criterios actualizados y más precisos para la calificación energética, incluyendo la energía primaria total y renovable y se promueve el uso de plataformas digitalizadas para el registro y control que favorecen la actualización y transparencia.

Además, como en las etapas anteriores se actualiza la ERESEE en 2020 incorporando un diagnóstico mucho más detallado [4]. Se explica exhaustivamente las medidas e iniciativas que se han llevado a cabo relacionadas con la rehabilitación energética, incluyendo la vulnerabilidad energética. Los objetivos son más ambiciosos con metas para 2030, 2040 y 2050, describiendo posibles escenarios de ahorro en función de las medidas llevadas a cabo y proponiendo mejoras para la financiación de intervenciones.

Dentro de estos objetivos se enmarca también el PNIEC 2021-2030 publicado en 2020, y actualizado en 2024 para el horizonte 2023-2030 de acuerdo con la normativa europea, el cual establece varios objetivos generales para la transición hacia un modelo energético más sostenible en España [2], [8]. Entre sus metas principales, se destaca la reducción de GEI en un 32% respecto a 1990, el aumento de las energías renovables, con un 48% en el consumo final bruto y un 81% en la generación eléctrica renovable para 2030. El plan también busca mejorar la eficiencia energética final en un 43% y la reducción de la dependencia energética en un 50%, además de promover la descarbonización del transporte mediante el fomento de la movilidad eléctrica y sostenible. En concreto, en materia de rehabilitación energética se propone la rehabilitación de 1,37 millones de viviendas antes del 2030, a un ritmo de 80.000 viviendas al año. Además, el PNIEC propone reducir la pobreza energética, implementando medidas para proteger a los hogares vulnerables y mejorando la eficiencia energética de las viviendas.

Finalmente, cabe destacar, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) iniciativa puesta en marcha en 2021 en respuesta a la crisis generada por la pandemia de COVID-19 y su Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (MRR), financiado por los fondos *NextGenerationEU* [120]. Tiene como objetivo una recuperación económica neutra en carbono, eficiente y competitiva, a través de la generación de empleo y la modernización del sector de la construcción. Dentro de este MRR, destaca el RD 853/2021, que regula los programas de ayuda en materia de rehabilitación residencial y vivienda social del PRTR [121]. Este plan ha acelerado la rehabilitación energética mediante programas específicos de ayudas, subvenciones y beneficios fiscales para la rehabilitación energética de edificios residenciales, así como programas de desarrollo urbano sostenible.

2.2.3. Evolución y análisis de los programas de ayudas en España

De las iniciativas llevadas a cabo a nivel estatal, han surgido las principales iniciativas para incentivar la rehabilitación energética en los edificios residenciales, entre las que destacan las siguientes:

Objetivo 2020

A nivel estatal, el primer Programa de Ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios en España (PAREER) se estableció en 2013 bajo el Real Decreto 233/2013, dentro del Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas 2013-2016. Estaban en concordancia con las estrategias “20-20-20” de la Directiva 2012/27 UE, financiadas por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y gestionadas por el Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [122]. Su objetivo principal era mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía en edificios. Para cumplir con los requisitos del programa, los proyectos debían mejorar la calificación energética del edificio al menos en un nivel, abarcando actuaciones como la mejora de la envolvente térmica, la eficiencia de las instalaciones térmicas, la iluminación y la incorporación de energías renovables. Las ayudas consistían en subvenciones directas para cubrir una parte de los costes de rehabilitación, combinadas con préstamos reembolsables con condiciones ventajosas. Además de la ayuda base, un porcentaje entre un 20-30% del coste de la actuación, se

podía conseguir un porcentaje adicional por: a) actuación integrada; b) eficiencia energética obteniendo una nueva clase energética “A” o “B” o incrementando dos letras en la calificación energética de partida; o c) criterios sociales considerados para Viviendas de Promoción Pública y Viviendas de Protección Oficial en Régimen Especial, o Áreas de Regeneración y Renovación Urbanas. A este plan le siguió en el año 2015 el programa PAREER-CRECE, con un enfoque adicional en la integración de energías renovables, tales como biomasa, geotermia y energía solar térmica. El programa continuó exigiendo la mejora de la calificación energética del edificio en al menos un nivel y estableció que las instalaciones de fuentes renovables debían cubrir un porcentaje mínimo de la demanda energética [123]. En 2018, el programa anterior dio continuidad al PAREER II que incorporó a los criterios anteriores el umbral mínimo de ahorro energético del 30% con respecto a la situación inicial del edificio [124].

Objetivo 2030 y 2050

Posteriormente, el Programa de Rehabilitación Energética de Edificios 2020 (PRE-2020) fue regulado por el Real Decreto 737/2020 y se enmarcó en los compromisos del PNIEC y posteriormente en el PRTR [125]. Comparten objetivos y características en cuanto al ahorro energético y emisiones de GEI similares, pero desglosando más específicamente las acciones y sus porcentajes de ayuda. Además, se incorpora el criterio social a los edificios ubicados en Áreas de Regeneración y Renovación Urbanas o Rules (ARRUR). Cabe destacar que, a partir de este momento, la gestión pasa a ser autonómica y hay un reparto territorial de fondos. Alineado con este programa, la convocatoria PREE-5000, propone la rehabilitación energética para edificios existentes en municipios de reto demográfico (menos de 5.000 habitantes) [126].

Adicionalmente, en el RD 853/2021, dentro del MRR y en línea con el PRTR se regulan los programas de ayuda en materia de rehabilitación residencial y vivienda social [121]. A diferencia de los casos anteriores, se proponen 6 líneas de actuación a diferentes escalas: barrio, edificio, vivienda, apoyo a las oficinas de rehabilitación, elaboración del libro del edificio existente y redacción de proyectos de rehabilitación, así como la construcción de viviendas en alquiler social en edificios energéticamente eficientes. En este caso, los criterios para acceder a estas ayudas son muy diversas y se abordan desde una perspectiva más holística. Destaca la posibilidad de financiación al 100% en casos de vulnerabilidad económica en la rehabilitación de barrios y edificios, y la definición de Entornos Residenciales de Rehabilitación Programada (ERRP), sustituyendo al antiguo concepto de Área de Regeneración y Renovación Urbana y Rural (ARRUR), para la actuación de barrios. Finalmente cabe mencionar que desaparece el concepto de préstamo, aunque sí se contempla la posibilidad de adelantos.

Barreras y límites de las estrategias de rehabilitación energética

La creciente preocupación por la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental y los esfuerzos para impulsar la rehabilitación energética como punto clave para mejorar la habitabilidad y hacer frente al cambio climático son evidentes. Sin embargo, la tasa de renovación energética anual ponderada en la UE es baja, en torno al 1 %. Además, las renovaciones profundas que reducen el consumo de energía en al menos un 60 % solo se realizan anualmente en el 0,2 % del parque inmobiliario y siendo

prácticamente inexistentes en algunas regiones [3]. En España, el número de visados destinados a reforma o restauración de viviendas para el periodo 2017-2020 fue de 26.774 anuales, inferior a lo previsto por el PNIEC, de un ritmo aproximado de 80.000 viviendas al año [2], [127].

De acuerdo con el 2023-2020 y la ERESEE 2020, algunos de los factores que están limitando el proceso de rehabilitación energética son la falta de conocimiento, la complejidad técnica y las dificultades de planificación o previsión, que lleva a la percepción que es un trámite complejo, costoso y sin una continuidad definida [2], [127]. Sin embargo, la falta de financiación se identifica como una de las mayores barreras, tanto por la incapacidad de hacer frente al gasto como por la falta de rentabilidad. Por ejemplo, mientras que en los primeros programas no se hacía referencia a este hecho, en posteriores convocatorias se han ido incluyendo ventajas para las viviendas de protección oficial (VPO) o de régimen especial, personas con bono social e incluso las nuevas líneas hacen referencia a la posibilidad de subvencionar el 100% de la actuación en actuaciones a nivel de barrio y edificio, aunque no a escala de vivienda.

Sin embargo, en España en 2019, el presupuesto medio de renovación del edificio residencial fue de 47.286 €. Esta cantidad resulta inviable para los colectivos con menos recursos, pero también poco atractivo para otros grupos cuyos objetivos no están tan centrados a largo plazo, como las personas mayores, pese a ser ambos colectivos especialmente vulnerables (Sección 2.1.3.). En este sentido, la ERESEE 2020 define como una estrategia clave la combinación de estas estrategias de rehabilitación energética con otras actuaciones como las de accesibilidad o conservación y mantenimiento. Los ERRP recogen esta idea, aunando conjuntos residenciales con altas necesidades de renovación urbana y edificatoria, sin embargo, se limita a áreas muy concretas que pueden estar dejando atrás a viviendas con características similares. Por otro lado, cabe destacar que, de forma generalizada, las actuaciones promovidas han estado centradas en la implantación de grandes inversiones a nivel edificio, sin centrarse detalladamente en sus peculiaridades, más allá del año de construcción. Este hecho podría suponer algunas barreras, a nivel logístico en las comunidades de propietarios, ya que un 68% de las viviendas primarias en España son colectivas. Además, más allá del año de construcción, otros factores, como las características urbanas, la morfología, propiedades constructivas, orientación e incluso la ubicación de la vivienda son cruciales a la hora de definir un potencial de ahorro. Por ello, de forma complementaria, actuaciones de coste medio, podrían ser de gran rentabilidad en viviendas identificadas con alta demanda energética.

2.3. Identificación de la rehabilitación energética preferente

Pese a que los esfuerzos para adaptar y mejorar los planes de rehabilitación energética han sido notorios, los criterios generalistas para la caracterización del parque edificatorio y la población que lo habita podrían reducir la efectividad y accesibilidad de las actuaciones. Frente a esto, la rehabilitación energética preferente se presenta como una solución clave y holística reduciendo el consumo de energía y mejorando la habitabilidad, especialmente para aquellas situaciones de riesgo térmico.

Desde el punto de vista de la gestión, el riesgo ha sido definido por varias fuentes como la combinación de la probabilidad de que un evento ocurra (exposición) y las consecuencias de dicho evento (vulnerabilidad) [128], [129], [130].

Aplicando este concepto al riesgo térmico, podemos definirlo como la combinación de situaciones de:

- Una alta exposición al estrés térmico por factores ambientales ya sea por condicionantes climáticos y del entorno o las condiciones de habitabilidad térmica de las viviendas. En este sentido, los climas representativos y sus modificaciones a nivel microclimático, así como las condiciones urbanísticas, arquitectónicas y constructivas de los hogares son indicadores clave.
- Una alta vulnerabilidad para hacer frente a esta situación de estrés, debido a factores socioeconómicos, que limitan el poder costear las facturas energéticas o mejorar térmicamente las viviendas, así como las condiciones de salud, que pueden potenciar al morbilidad y mortalidad. Esta vulnerabilidad, se pueden determinar a través de índices demográficos, nivel de renta, privación material, o intensidad de trabajo.

La Tabla 1 resume los principales factores de riesgo asociados a la exposición y vulnerabilidad a partir de diferentes trabajos [131] [69], [132].

RIESGO TÉRMICO-ENERGÉTICO: alta exposición + alta vulnerabilidad			
ORIGEN			FACTORES CONDICIONANTES E INDICADORES
EXPOSICIÓN	AMBIENTALES	Clima actual y futuro. Condiciones exteriores	Global: Aumento de la temperatura y cambio climático. Eventos climáticos extremos (olas de calor, frío, sequías, inundaciones). Proyecciones futuras Regional: Sur de Europa y Mediterráneo, zonas interiores y áridas. Pérdida de biodiversidad. Local: Núcleos urbanos densos sin espacios verdes o abiertos (alta ICU), alta contaminación.
		Estado del edificio	Baja habitabilidad: sin climatización, pobreza energética, mal aislamiento o confinamiento. Exposición continuada a altas temperaturas, especialmente por la noche (noches tropicales) Infravaloración de los sistemas de refrigeración más afectadas las últimas plantas.
VULNERABILIDAD	ESTADO DE SALUD	Edad y sexo	Personas de edad avanzada, especialmente mujeres Niños en situación de exclusión, especialmente al frío.
		Características físicas	Patologías previas: Circulatorias, respiratorias, renales, neurodegenerativas o mentales. Estado físico: Embarazo, obesidad, deshidratación, medicación, fiebre o embriaguez. Estilo de vida: Alcoholismo o tabaquismo
	SOCIALES Y ECONÓMICOS	Económico	Trabajadores manuales o con desarrollo de actividad exterior. Personas con rentas bajas o baja intensidad de trabajo Privación material de consumo básico
		Social	Bajo nivel de educación o migrantes Personas en riesgo de exclusión social. Personas solas, dependientes o con baja sociabilización. Personas que sufren exposición al calor por deporte u ocio
		Sistema de salud	Infraestructuras y sistemas de salud deficientes. Ineficacia de sistemas de alerta temprana y comunicación. Baja o nula educación de "Cultura del calor y frío".

Tabla 1. Factores de riesgo térmico o energético. Combinación de alta exposición y vulnerabilidad

Para identificar de forma exhaustiva las situaciones de alta exposición térmica, los programas de modelado térmico y energético son herramientas fundamentales. Por otro lado, las metodologías de

identificación prioritaria van más allá, añadiendo a esta capa térmica-energética factores de vulnerabilidad.

2.3.1. Características de las herramientas de modelado térmico y energético

Las herramientas de modelado térmico edificatorio o urbano permiten conocer el nivel de confort térmico o demanda energética de las construcciones partiendo de la caracterización climática, características del entorno construido y diferentes metodologías de cálculo de respuesta térmica.

Caracterización climática

Para la caracterización climática son necesarias fórmulas que representen las condiciones climáticas típicas del lugar de estudio de largos periodos, al menos de 10 años, de forma que se consideren correctamente los ciclos climáticos naturales. Por eso las metodologías de Año Representativo Tipo (*Typical Meteorological Year*, TMY) tienen como objetivo definir un conjunto de datos meteorológicos típicos que representen un año promedio a través de la concatenación de los meses más representativos del periodo de análisis. De tal forma, estos datos no corresponden a un año real específico, sino que se componen de los valores promedio de las condiciones meteorológicas para cada mes seleccionado. El concepto de TMY fue desarrollado en la década de 1970 por los Laboratorios Sandia para la evaluación de los sistemas solares, basándose únicamente en la radiación solar y temperatura [133]. Posteriormente el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), actualizó este proceso con la metodología TMY2 y TMY3 en los años 90 y 2000 respectivamente [134], [135]. Estas actualizaciones incluyeron otras variables como la velocidad del viento, la humedad relativa y la precipitación, lo que amplió su uso en la modelización energética edificatoria. Además, se mejoró la selección de meses representativos con el método estadístico Finkelstein-Schafer (FS), en el que actualmente está basado el TMY definido por la UNE-EN-ISO-15927-4:2011 para la evaluación del promedio de calefacción y refrigeración anual [136], [137]. De forma alternativa, existen otras metodologías, también enfocadas en el cálculo energético de los edificios, pero con pequeñas variaciones en el sistema de concatenación de meses o factores de ponderación de las variables climáticas como la usada por la usada por el software PVGIS o la metodología PASCOOL [138][139][140]. En España, entre los métodos ampliamente utilizados destacan el *International Weather for Energy Calculations* (IWECC) definido por ASHARE o el *Spanish Weather for Energy Calculations* (SWECC) que se desarrollaron para su uso en el programa Calener y que se generaron de forma sintética utilizando el software portugués Climed, siendo ambos proporcionados por la herramienta *EnergyPlus* [141], [142], [143]. A nivel normativo, destacan los archivos climáticos definidos por el CTE para su utilización normativa (MET) [144]. Por otro lado, cuando no se dispone de largos periodos de tiempo de análisis, se recurre a los generadores meteorológicos basados en algoritmos informáticos. Estos datos, denominados sintéticos, producen una larga serie de variables meteorológicas con propiedades estadísticas mediante la comparación con los registros históricos existentes de referencia. Softwares de referencia, como Meteonorm, se basan en este proceso [145].

Sin embargo, el modelado energético urbano no siempre logra incorporar adecuadamente esta realidad climática en evolución [146]. Los datos normativos definidos por el Código Técnico de la Edificación (MET), datan su última actualización en 2013 (a excepción de las zonas climáticas de Canarias) [141], [147]. Además, estas fuentes climáticas, a menudo derivadas de entornos no urbanos como aeropuertos, omiten la influencia crucial de la morfología de la ciudad en la dinámica energética de los edificios [148]. Este hecho podría desconsiderar las nuevas tendencias climáticas, afectando a la precisión de las bases de datos climáticas existentes [149], [150]. Relativo a esto, diferentes investigaciones apuntan a una sobreestimación de las demandas de calefacción, mientras que las demandas de refrigeración y el estrés térmico podrían estar infravalorándose [149], [151].

Caracterización urbana y edificatoria

Aunque las ciudades modifican los sistemas ecológicos, la intensidad de los riesgos ambientales depende de las características urbanas de las zonas construidas [152]. Por lo tanto, las ciudades no deben considerarse como un conjunto de edificios homogéneo. En su lugar, se deben tener en cuenta diferentes escalas y granularidades en la evaluación del entorno construido [153] para desarrollar soluciones personalizadas que permitan enfrentar los desafíos del cambio climático en las áreas urbanas [154], [155].

Los bloques de manzanas urbanos, entendidos aquí como la combinación de edificios y sus condiciones ambientales urbanas próximas, modifican los flujos de energía externos localmente y, en consecuencia, las variables meteorológicas exteriores, afectando a las condiciones térmicas de las viviendas debido al ya mencionado fenómeno de microclima urbano [156], [157]. Este hecho afecta crucialmente al estudio del confort térmico y demanda energética de los edificios, siendo clave su consideración en la definición de los planes de rehabilitación energética y regeneración urbana [52], [158]. Consecuentemente, las características urbanas y edificatorias se presentan como factores cruciales en las estrategias de mitigación y adaptación climática [159], [160], [161].

Bajo esta idea, se han desarrollado dos aproximaciones a la hora de caracterizar el comportamiento térmico de la ciudad. Los sistemas de modelado energético de edificios urbanos (*Urban Building Energy Models*, UBEM) simulan grandes estructuras construidas de manera multifacética, generalmente desde una aproximación *top-down*. Estos modelos UBEM se presentan como muy prometedores, aunque encuentran algunos desafíos computacionales y de datos, lo que lleva a simplificaciones e inexactitudes. Un ejemplo de esta herramienta *CityBES* desarrollada por el *Lawrence Berkeley National Laboratory* [130], [162]. Por el contrario, los modelos de energía de edificios (*Building Energy Models*, BEM) más refinados utilizan los datos inferidos de edificios representativos, generalmente aislados de su contexto urbano. Comúnmente su aproximación es *bottom-up*, y se enfocan principalmente en el estudio de posibles ahorros de energía [163]. Sin embargo, se ha demostrado que el análisis energético de las viviendas requiere considerar no solo una descripción detallada de las características del edificio, sino también sus condiciones de contorno (es decir, las características de los materiales, morfológicas y arquitectónicas que rodean el edificio).

Comprender y considerar estas diferencias es fundamental al evaluar el comportamiento térmico urbano [164]. Investigaciones emergentes han vinculado la influencia que los diferentes patrones urbanos tienen en el consumo de energía, usando técnicas que incluyen el aprendizaje automático [165] [166]. Por ejemplo, se ha demostrado que las morfologías residenciales compactas de alta altura presentan temperaturas externas más elevadas y una humedad relativa más baja respecto a las zonas de bloque abierto, especialmente durante la noche, afectando al consumo energético y confort térmico [159].

Por otro lado, los bloques de manzanas urbanos con parámetros comunes están vinculados a períodos arquitectónicos específicos con técnicas similares, asociadas a las tendencias históricas, políticas y sociales del momento [167]. Por lo tanto, la clasificación de dichas tipologías urbanas podría simplificar y ayudar a comprender el comportamiento energético del stock de edificios, al proporcionar un punto intermedio entre el análisis preciso de edificios independientes y las aproximaciones energéticas urbanas menos detalladas. A pesar de la singularidad de cada edificio residencial, se pueden encontrar puntos en común en cuanto al rendimiento energético del edificio completo. Esta aproximación, basada en la identificación de patrones urbanos y edificatorios análogos, puede ser de gran importancia para estimar el comportamiento térmico urbano, así como el potencial de reducción de GEI y estrés térmico. Esto es particularmente relevante para los tejidos residenciales, que representan el 74% del área construida de Europa [168].

Por lo tanto, los enfoques centrados en la categorización de tipologías de bloque de manzana urbano similares se presentan como herramientas útiles para evaluar la heterogeneidad energética de los edificios en entornos construidos complejos. Sin embargo, existe una falta de correlación entre las clasificaciones de tipología de edificios y su entorno circundante. Los detallados parámetros locales del stock de edificios tradicionalmente utilizados para el análisis BEM y la amplia resolución espacial geométrica en el contexto urbano de las evaluaciones UBEM dificultan la precisión de las clasificaciones actuales [169]. Por otro lado, pese a que durante la planificación y construcción se tienen en cuenta diferentes métricas para garantizar una buena calidad de vida como la densidad edificatoria, el cañón urbano, porcentajes de dotaciones, soleamiento o mínimos térmicos, no existen unos límites e indicadores claros para categorizar las tipologías de bloques urbanos desde el punto de vista energético, considerando ambas perspectivas urbana y edificatoria. Además, en ocasiones, esta categorización se basa en componentes cualitativos, relativos a las características de construcción locales o regionales. Consecuentemente, este enfoque subjetivo dificulta la comparación a gran escala y su uso en otras áreas. Por último, cabe destacar que mientras que los datos urbanos generalmente se recopilan de censos o encuestas a nivel de vecindario o municipal, a menudo no se desagregan a escala de tipología de edificio, lo que también limita dicha clasificación. Ante esto, proyectos como el *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT), conscientes de esta desconexión urbano-edificatoria, promueven un análisis completo, considerando tres escalas diferentes: regional-ciudad, vecindario y edificio [170]. No obstante, todavía no existe una metodología clara para definir esto último.

Cálculo del confort térmico

Por otro lado, debemos tener en cuenta, que, para la cuantificación de los límites de confort o estrés térmico, existen diferentes metodologías de aproximación, al igual que definiciones. Por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) define confort como “un estado de completo bienestar físico, mental y social”. Alternativamente, la norma ISO 7730 o ASHRAE explican el confort térmico como “la condición mental en la que se expresa satisfacción con el ambiente térmico” [47]. Desde la perspectiva del balance energético se establece que el ser humano se encuentra en una situación de confort térmico, cuando las ganancias y pérdidas energéticas de su cuerpo se encuentran en equilibrio con las del medio ambiente.

Considerando esta última perspectiva podemos definir el confort térmico a través del balance de energía calórica del cuerpo humano, mediante la ecuación de Fanger (Ecuación 1):

$$M - W = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{sud} + Q_{res} + S \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde M es la potencia metabólica, W es la potencia mecánica, Q_{rad}, Q_{conv}, Q_{cond}, Q_{sud} y Q_{res} son los flujos unitarios de pérdidas de calor por radiación, convección, conducción, sudoración y respiración respectivamente y S es la energía por unidad de tiempo que se almacena en el cuerpo. Este balance dependerá del intercambio energético entre el ser humano y las superficies que le rodean. El intercambio por radiación depende de la emisividad del cuerpo, tipo de actividad, factor de forma, temperatura superficial del cuerpo o vestimenta y temperatura superficial de las superficies que rodean el cuerpo (temperatura media radiante, T_{mrt}). En el intercambio por convección influye el movimiento del aire en torno al cuerpo y depende de la temperatura corporal y del ambiente y el tipo de vestimenta. El intercambio por conducción está caracterizado por la transmisión del calor de la piel al ambiente o superficies en contacto y dónde la vestimenta actúa como aislante. Finalmente, en el intercambio por sudoración y respiración, interviene el calor latente debido a la evaporación y depende de la actividad y del metabolismo de la persona, variando en función de la edad, sexo, altura o peso [171].

Desde el punto de vista de la cuantificación, las metodologías de cálculo se pueden clasificar:

- Según la flexibilidad de adaptación:

Los índices racionales o estáticos están basados en cálculos matemáticos y principios físicos, que consideran condiciones térmicas fijas. Se basan en el equilibrio térmico del cuerpo humano y la transferencia de calor entre el cuerpo y el entorno para asegurar el confort térmico. Están centrados en el estudio de la respuesta térmica en cámaras estáticas y controladas. Por otro lado, los métodos adaptativos se centran en la capacidad de respuesta y adaptación que presenta nuestro cuerpo al ambiente exterior y sus expectativas [172]. Surgieron tiempo después de los empíricos y responden mejor ante ambientes reales, cambiantes y poco controlables como las edificaciones con ventilación

natural. Además, este concepto amplía los rangos de temperatura de consigna necesarios para alcanzar el bienestar térmico reduciendo las necesidades energéticas de los edificios [173].

- Según el método de cuantificación:

Los índices analíticos se basan en principios físicos y matemáticos, que utilizan ecuaciones para predecir la sensación térmica en función de las condiciones ambientales y las características del individuo. En cambio, los métodos empíricos, consideran datos obtenidos a través de encuestas, observaciones directas o estudios de campo que se utilizan para establecer relaciones entre las condiciones ambientales y la percepción del confort. Son métodos de cálculo más simples, aunque presentan limitaciones a la hora de considerar la fisiología humana y por ello, son utilizados frecuentemente en las primeras etapas de los estudios de confort

- Según el ámbito de aplicación:

Los indicadores originalmente estaban pensados para la evaluación interior de edificios, considerando la temperatura del aire, humedad, velocidad del aire, radiación y actividad de los ocupantes.

Sin embargo, los índices de evaluación exterior han ido adquiriendo importancia a medida que se ha ido estudiando la relevancia de los espacios exteriores en la calidad de vida. Se centra en el confort térmico en espacios abiertos, como calles, plazas o parques, considerando factores como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento. Además, la temperatura media radiante (TMR), es decisiva en el confort de los espacios exteriores [160].

Uno de los índices más relevantes dentro del grupo racional, analítico e interior es el Voto Medio Previsto y Porcentaje Previsto de Insatisfechos (*Predicted Mean Vote- Predicted Percentage of Dissatisfied*, PMV-PPD) definido por Fanger en 1972. Forma parte de las normas internacionales de confort térmico, como la ISO 7730 y ASHRAE 55 [174]. El PMV predice una escala de sensación térmica con rangos de -3 (frío) a +3 (calor), basado en parámetros como la temperatura del aire, la temperatura radiante, la humedad, la velocidad del aire, la vestimenta y el nivel de actividad. El Porcentaje Previsto de Insatisfechos (PPD) se calcula en función del PMV y estima el porcentaje de insatisfechos térmicamente. Dentro de este grupo también se encuentra la Temperatura Efectiva (*Equivalent Temperature*, ET) que se define considerando la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del aire, proporcionando una medida del confort térmico percibido en un entorno y es especialmente relevante en estudios donde la humedad tiene un papel protagonista

Por otro lado, dentro del enfoque adaptativos, empírico e interior está el modelo adaptativo de ASHRAE 55 y la norma UNE 16798. En ambos casos, se define una temperatura óptima interior (*Top*), en función de la temperatura exterior, hasta ciertos límites. A partir de esta *Top*, se establecen unos rangos de tolerancia. El modelo adaptativo de ASHRAE 55 tiene su origen en el análisis de una base de datos internacional que recopilaba las experiencias de confort térmico de aproximadamente 21000 observaciones en 160 edificios de oficinas a lo largo de cuatro continentes. Esta norma utiliza la temperatura prevalente media del aire exterior y rangos del 80% y 90% de aceptabilidad. Alternativamente, la norma UNE 16798 está basada en el proyecto *Smart Controls and Thermal*

Comfort (SCATs), testado en Europa, el cual se centraba en analizar la respuesta térmica adaptativa de los usuarios ante diferentes condiciones [175]. Esta norma UNE utiliza la temperatura exterior media en funcionamiento y define tres clases de admisibilidad, en función del nivel de expectativa.

Para la cuantificación del confort exterior son comunes, en una primera fase los indicadores racionales y empíricos, como el Índice de Estrés por Calor (HSI, *Heat Stress Index*), el Índice de Temperatura del Globo Húmedo (WBGT, *Wet Bulb Globe Temperature Index*), el Índice de Calor (HI, *Heat Index*) y el Índice de Malestar (DI, *Discomfort Index*) [176]. Todos ellos, combinan diferentes variables ambientales, basados en la temperatura o la humedad relativa. Por otro lado, para definir de forma más exhaustiva las condiciones exteriores, se suele recurrir a indicadores racionales analíticos. Este es el caso de la Temperatura percibida, *Percived Temperature* (PT), Temperatura efectiva estándar exterior, *Out Standard Effective Temperature* (OUT_SET*) o la Temperatura psicológica equivalente, *Physiologically Equivalent Temperature* (PET) [171][177][178][179][180].

Finalmente, el Índice de confort térmico universal, *Universal Thermal Comfort Index* (UTCI) destaca por su versatilidad. Aunque fue diseñado para ambientes exteriores, también es utilizado en interiores, combinando factores racionales y adaptativos. Fue desarrollado por la acción europea COST 730 y se basa en el concepto de temperatura equivalente. Define la temperatura del aire que en condiciones de referencia provocaría la misma respuesta del modelo fisiológico que el entorno real. Este modelo combina la transferencia de calor en el cuerpo desagregado diversas zonas corporales, con un modelo arropamiento adaptivo. Pese a que su cálculo es complejo, se ha simplificado mediante funciones de regresión que utilizan como datos de entrada la temperatura media radiante, velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa. Una ventaja clave del UTCI es que permite comparaciones entre distintos climas, estaciones y escalas.

2.3.2. Metodologías de identificación energética prioritaria

Las metodologías de identificación prioritaria relacionadas con la rehabilitación energética consideran, no sólo con las condiciones edificatorias relacionadas con el consumo energético, sino que combinan estos factores con indicadores de vulnerabilidad, estando muy relacionado con concepto de pobreza energética en las viviendas.

Esta idea ha estado ligada, desde su origen, a la combinación de varios factores relacionados con los elevados precios de la energía, los bajos ingresos de los hogares y la falta de eficiencia energética de las viviendas. Las primeras aproximaciones metodológicas que se utilizaron fueron en Reino Unido y para abordar este problema se centraron en el indicador de gasto real de los hogares basado en la encuesta sobre las condiciones de los hogares [181]. Sin embargo, esta aproximación presentaba algunas limitaciones asociadas a los cambios en las facturas energéticas, las suposiciones de lo que se considera que son temperaturas adecuadas, y los ingresos reportados en encuestas que no están enfocadas a la medición del nivel de ingresos de la población. A partir de 2015 Reino Unido modificó la metodología de aproximación, considerando esta vez la idea de “Bajos ingresos y altos costes energéticos”. De tal forma que se considera que un hogar está en pobreza energética cuando combina

dos conceptos: (i) Sus necesidades energéticas son superiores a la mediana nacional y (ii) gastar esa cantidad les situaría "por debajo de la línea de pobreza oficial" [182]. Este nuevo enfoque define como variables esenciales el tamaño del inmueble, el número de personas que viven en dicho inmueble, la eficiencia energética de la vivienda y el mix de los distintos combustibles utilizados para el hogar.

La aproximación propuesta anteriormente, presentaba algunas limitaciones a la hora de compararla con otros países, debido al clima, nivel de rentas o condiciones socioeconómicas. Por ello, a nivel europeo, se desarrolló el "enfoque consensuado" [183]. Esta idea está basada en la percepción que los hogares tienen de su capacidad de mantener la vivienda a una temperatura adecuada [184]. Para ello se utilizan una serie de indicadores subjetivos recogidos en las estadísticas de la UE sobre Ingresos y Condiciones de Vida como la incapacidad de calefactar la vivienda adecuadamente, la incapacidad para pagar las facturas energéticas o la ausencia de un sistema de calefacción y otros indicadores objetivos como la presencia de humedades, la carencia de un sistema de calefacción central o la presencia de marcos de ventana podridos [185], [186]. Este enfoque ha permitido identificar factores clave que podrían limitar mantener unos mínimos de habitabilidad térmica en las viviendas como son: las familias monoparentales, las viviendas en bloque, las personas que viven solas, personas con menor nivel de estudios, desempleados y beneficiarios de ayudas sociales y aquellas personas en régimen de alquiler. La Figura 10, presentada anteriormente, muestra el porcentaje de población con inconvenientes para conseguir unos mínimos de habitabilidad, destacando los bajos valores de España en todos los indicadores respecto a Europa.

En este sentido, en España, se han definido diferentes metodologías y proyectos para caracterizar el comportamiento térmico de los edificios y su potencial de mejora mediante la rehabilitación energética. Entre ellas, destacan algunas que, además de incluir criterios puramente energéticos, combinan aspectos socioeconómicos con el fin de identificar áreas preferentes de rehabilitación energética. Un ejemplo es el trabajo de Carmen Sánchez-Guevara Sánchez, que define un método de evaluación de la pobreza energética de los hogares en el contexto español que incorpore las particularidades climáticas, edificatorias y socioeconómicas del país [173]. Este método debe servir como herramienta en la identificación de los hogares que se encuentran en situación de pobreza energética, así como del grado de necesidad de los mismos. Esta propuesta constituye una ayuda en la toma de decisiones de cara al desarrollo de políticas y actuaciones de rehabilitación energética de viviendas.

La Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024, define como indicadores para detectar la pobreza energética un gasto desproporcionado, la pobreza energética escondida, la imposibilidad de mantener una adecuada temperatura en la vivienda y el retraso en el pago de suministros de la vivienda [187]. Estos valores están calculados a partir de la Encuesta de Condiciones de Vida (ECV) y de la Encuesta de Presupuestos Familiares (EPF), elaboradas también por el INE.

El estudio técnico sobre pobreza energética en la ciudad de Madrid combina varios indicadores para definir la pobreza energética: (i) factores determinantes como el nivel de ingresos de los hogares, las características de los inmuebles y el clima de la ciudad, (ii) factores agravantes relacionados con el

régimen de tenencia, la composición de los hogares y las características sociodemográficas del sustentador principal y (iii) la mortalidad [188]. Por otro lado, el estudio de Feminización de la Pobreza Energética en Madrid también señala como aspectos agravantes los hogares ocupados por mujeres mayores, monoparentales encabezados por una mujer, o aquellos en los que la sustentadora principal es una mujer [77].

Los estudios presentados anteriormente, están basados en datos estadísticos que, pese a proporcionar una metodología exhaustiva y eficiente, están limitados por la accesibilidad de los mismos y frecuentemente presentados de forma agregada, limitando el estudio desagregado a nivel edificatorio. Además, esta información está condicionada a errores de muestreo o sesgos en la recopilación y cubren ciertas condiciones temporales y espaciales específicas, lo que puede hacerlos insuficientes para definir contextos o escenarios futuros.

Por el contrario, las metodologías basadas en la simulación, aunque pueden introducir errores debido a simplificaciones del modelo, sí que ofrecen mayor flexibilidad para explorar diferentes resultados para cada una de las edificaciones y que permiten evaluar la relación entre morfología urbana y demanda energética. En este sentido, la investigación de Fernando Martín-Consuegra Ávila, desarrolla un modelo de análisis de datos espaciales que combina datos catastrales y censos de población de viviendas para evaluar la eficiencia energética del parque edificatorio de Madrid, centrándose en el modelado de los consumos calefacción [189]. El estudio se basa en la capacidad de mejora de a la envolvente de los barrios vulnerables, usando como caso los identificados en el Atlas de Barrios Vulnerables en Madrid (Ministerio de Fomento y la Universidad Politécnica de Madrid 2017). Estos barrios vulnerables, combinan datos de factores relativos a las condiciones de la vivienda, sociales y laborales, a partir de datos estadísticos elaborados por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

Sin embargo, cabe destacar que estos trabajos están centrados principalmente en la privación del uso de calefacción. Sin embargo, como se muestra en la Sección 2.1., los recientes escenarios de cambio climático que han supuesto un claro aumento general de las temperaturas y eventos climáticos extremos más frecuentes, intensos y prolongados como las olas de calor, que han hecho reflexionar sobre el impacto que supone para la salud y las necesidades energéticas.

La combinación de una metodología que incorpore la adaptabilidad a diferentes escenarios climáticos y configuraciones morfológicas, junto con el uso de datos estadísticos para variables de acceso restringido, como la información socioeconómica, puede ofrecer un enfoque equilibrado y eficiente para priorizar la evaluación energética y térmica de las viviendas.

2.3.3. Estrategias de descarbonización en los hogares

La rehabilitación energética es una herramienta fundamental para alcanzar los objetivos de descarbonización propuestos por la Agenda 2030, el Acuerdo de París y las estrategias europeas como el Pacto Verde, la *RenovationWave* y la Directiva EPBD 2024/1275 [3], [5], [87]. En coherencia con estas políticas y el PNIEC, la Estrategia a Largo Plazo (ELP) desarrollada para España articula una respuesta

coherente e integrada frente a la crisis climática, que aproveche las oportunidades para la modernización y competitividad de nuestra economía y sea socialmente justa e inclusiva [8], [190]. Para ello, planea una hoja de ruta para avanzar hacia la neutralidad climática en 2050, combinando diferentes estrategias de adaptación y mitigación climática, economía circular, transición justa y cambio de comportamiento. Este marco presenta grandes retos y oportunidades, entre las que destacan:

- La previsión de una reducción del 50% del consumo de energía primaria entre 2021 y 2050, lograda mediante la mejora de la eficiencia energética y la electrificación, con una electricidad totalmente renovable para ese año. El modelo energético evolucionará hacia uno más descentralizado y basado en renovables, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y aumentando la seguridad energética.
- Las inversiones asociadas a la estrategia alcanzarán los 500.000 millones de euros entre 2031 y 2050, impulsando la economía, incrementando el PIB en un 1% y el empleo en un 1,6%. Fomentará la innovación tecnológica y nuevas oportunidades en sectores como el almacenamiento energético, el hidrógeno renovable, la movilidad sostenible y la rehabilitación de edificios, mejorando toda la cadena de valor de la industria y fomentando nuevos nichos de negocio
- Un impacto positivo en la salud pública, con una reducción del 64% de las muertes prematuras por contaminación en 2050 respecto a 2010, y beneficios adicionales como ciudades más habitables y mejor cohesión territorial en áreas rurales. El ahorro acumulado en importaciones de combustibles fósiles llegará a 344.000 millones de euros, contribuyendo a un modelo energético autóctono y sostenible.

La edificación sostenible es uno de los uno de los sectores clave dentro de estas políticas de descarbonización. Del total de 18,8 millones de viviendas construidas en España, más del 50% se consideren ineficientes, puesto que fueron construidas antes la aparición de la norma NBE-CT-79, que regula la incorporación de aislamiento térmico en la edificación [191], [192]. Además, se estima que en 2050 el 80% del parque edificado estará compuesto por edificios ya construidos, siendo necesario priorizar las actuaciones sobre la edificación existente [190]. Por ello, la renovación energética presenta actualmente una de las estrategias de ahorro energético más viables y resilientes, con un menor impacto ambiental en comparación con la demolición y la construcción nueva [193], [194]. Además, también puede mejorar la calidad y revalorización del edificio, así como prolongar vida útil [195], [196].

En este sentido, el principio propuesto por la Comisión Europea de “primero, la eficiencia energética” y la ERESEE 2020 presenta como orden lógico de descarbonización las siguientes actuaciones [127], [197]: 1) reducción de la demanda mediante actuaciones de eficiencia energética; 2) utilización de sistemas muy eficientes; y 3) aportando la energía final mediante energías renovables, fundamentalmente producidas in situ. Y junto a ellas, cabe destacar que una de las principales herramientas para actuar en la descarbonización de este sector es la electrificación.

Reducción de la demanda energética:

Este concepto incluye el uso de estrategias pasivas que optimizan el confort térmico. Gran parte de los esfuerzos actuales de descarbonización están enfocados en la incorporación del aislamiento térmico en la envolvente debido a su gran potencial de ahorro y mejora del confort térmico. Pese a sus costes iniciales, presentan bajos costes de mantenimiento y una extensa vida útil. Entre ellos, uno de los sistemas de renovación más utilizados es el Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE) en fachadas, que no solo soluciona puentes térmicos y problemas de condensación, sino que también tiene la ventaja de no reducir el espacio interior de las viviendas y mejorar la apariencia estética de los edificios. Su uso en climas como el de Madrid reduce las pérdidas y ganancias energéticas en un 57% y 39% respectivamente respecto a la fachada en su estado original [198]. Las cubiertas planas invertidas con una adecuada implementación del aislamiento térmico reducen las pérdidas de calor y mejora la eficiencia energética, especialmente en las viviendas de última planta en climas adversos [199]. En Madrid, las cubiertas ecológicas de 8 cm han mostrado ser efectivas, proporcionando ahorros energéticos considerables, promoviendo biodiversidad y requiriendo bajo mantenimiento [200]. La sustitución de huecos por aquellos con perfilera con rotura de puente térmico (RPT) y vidrios dobles con cámara de aire, también son una estrategia de ahorro energético significativa [201]. Dentro de los sistemas de climatización o ventilación pasivos las técnicas como el enfriamiento evaporativo indirecto y la protección solar pueden conseguir grandes ahorros energéticos mitigando el impacto del calor extremo [202]. Además, los sistemas solares diseñados adecuadamente en España podían cubrir hasta el 65% de la demanda de calefacción y el 46% de la refrigeración, contribuyendo significativamente al ahorro energético y a la reducción de emisiones de CO₂ [203]. Finalmente, los sistemas de domótica aplicados a la gestión energética optimizan la distribución y uso de recursos según la demanda y las condiciones climáticas [204], [205].

Equipos y sistemas de gestión energéticamente eficientes

La estrategia de eficiencia energética comúnmente propuesta en los hogares es la modernización de los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) [206]. Frente a las calderas tradicionales, las calderas de condensación alcanzan rendimientos superiores al 100%, ya que aprovechan el calor latente de los gases de combustión, generando ahorros entre el 15% y el 30% en comparación con calderas antiguas. Por otro lado, el uso de bombas de calor ofrece un gran potencial de reducción de GEI combinados con el uso de energías renovables [207]. Pese al aumento de los días de verano y las olas de calor, las mejoras en los sistemas de refrigeración y especialmente en los sistemas de ventilación y agua, como la implantación de sistemas de ventilación mecánica con recuperación de calor no son tan frecuentes en España [206]. La sustitución de la iluminación con tecnología LED supone ahorros de hasta el 80% en comparación con las tecnologías de iluminación tradicionales, como las bombillas incandescentes y fluorescentes [208]. Finalmente, el cambio de electrodomésticos a aquellos con una mejor etiqueta de eficiencia energética también supone estrategias alineadas con la reducción del consumo energético y los GEI [209]. Cabe destacar que el diseño de equipos que

permitan la sustitución de piezas fácilmente frente a la sustitución incremental del ciclo de vida de las instalaciones y reduce los costes de mantenimiento

Por otro lado, la digitalización y fomento de las microrredes de energías renovables, supone diferentes oportunidades de acceso y gestión de la energía. Los sistemas *peer to peer*, relacionados con la compraventa de la energía fomenta el papel de los prosumidores. Este concepto engloba particulares, instituciones o pequeñas empresas que producen y consumen energía, reduciendo la dependencia energética y mejorando la estabilidad del sistema [210], [211]. Por otro lado, tecnologías de redes inteligentes y recursos energéticos distribuidos, como instalaciones solares fotovoltaicas comunitarias, puede reducir los costes directos e indirectos de la implementación, mejorar la flexibilidad y la confiabilidad de la red, asegurando un acceso equitativo a la energía limpia para todos. Pese a que su implantación es todavía novedosa, resulta especialmente interesante combinado con otros sectores, más allá del residencial, donde existan diferentes perfiles de usos y un mayor espacio de implantación, en ocasiones limitados para la edificación colectiva existente.

Además, la monitorización y el uso de la tecnología *machine learning*, ayudan a predecir el comportamiento y a la toma de decisiones informadas para la selección de sistemas de gestión energética eficiente, ahorrando en las facturas de energía y disminuyendo los GEI [212].

Uso de energía proveniente de fuentes renovables.

El recurso solar permite que la instalación de sistemas fotovoltaicos y térmicos en edificios residenciales cubra una proporción significativa de la demanda energética, reduciendo drásticamente la dependencia de fuentes fósiles [213]. En España, el uso combinado de energía solar fotovoltaica para autoconsumo y solar térmica para agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares podría reducir el consumo energético entre un 67% y un 126%, disminuir las emisiones de CO₂ entre un 42% y un 100%, y generar ahorros económicos en las facturas energéticas de entre un 32% y un 81% dependiendo de la ubicación y configuración específica [214]. Los sistemas geotérmicos de baja entalpía combinados con bombas de calor han demostrado su capacidad para proporcionar calefacción y refrigeración con un impacto ambiental mínimo. Implementaciones recientes de redes geotérmicas circulares, como las denominadas "geobaterías", optimizan el uso de recursos geotérmicos superficiales, asegurando su sostenibilidad a largo plazo y logrando reducciones sustanciales de emisiones, estimadas en más del 60% en aplicaciones urbanas e industriales [215]. Las bombas de calor aerotérmicas, que aprovechan el calor del aire, son clave para la descarbonización. Combinadas con energía solar y geotérmica en sistemas híbridos, pueden mejorar la eficiencia estacional hasta un 17% y reducir proporcionalmente las emisiones de CO₂ [216]. Finalmente, la refrigeración por absorción, aprovechan el calor renovable para generar procesos de enfriamiento, minimizando el uso de electricidad y, con ello, las emisiones indirectas de GEI provenientes de las plantas generadoras de electricidad no renovable [217].

La combinación de estas energías renovables y la electrificación de tecnologías es clave para la descarbonización. Las pilas de combustible integradas con fotovoltaica aumentan la autosuficiencia energética y reducen emisiones, mientras que el almacenamiento de energía disminuye el desperdicio

de renovables y reduce hasta un 90% las emisiones de CO₂ [218], [219]. La infraestructura de recarga de vehículos eléctricos, junto con tecnologías como *Vehicle-to-Grid* (V2G), optimiza la red y extiende la vida útil de las baterías [220]. Estudios recientes también resaltan que la electrónica de potencia habilita una gestión más inteligente y flexible, promoviendo un mayor uso de energías limpias y reduciendo las pérdidas asociadas [221].

La implementación de estas estrategias de rehabilitación energética y descarbonización presenta grandes retos no sólo tecnológicos, sino también económicos y de concienciación, los cuales son necesarios abordar para potenciar un cambio hacia un desarrollo sostenible, siendo especialmente relevante para las poblaciones vulnerables.

En este sentido, los costes iniciales asociados con las mejoras en eficiencia energética, las instalaciones de energía renovable y las posibles actualizaciones eléctricas pueden ser muy elevados, particularmente para las reformas profundas que son las que generan reducciones sustanciales de carbono [222]. El fomento de soluciones *low-tech* o de bajo coste y alta rentabilidad son esenciales. Por ello, conocer y definir un catálogo de soluciones energéticas efectivas asociadas a la climatología del lugar es crucial [223]. Los modelos de financiamiento innovadores y programas de incentivos ampliados son fundamentales para mitigar este desafío. Los programas de subvenciones o fácil financiación y los modelos innovativos como el *Pay-As-You-Save*, pueden aliviar la carga inicial permitiendo a los propietarios de viviendas pagar las mejoras a través de sus facturas de energía a lo largo del tiempo [224]. Sin embargo, simplificar el acceso a estos programas y adaptarlos a las necesidades específicas de los hogares vulnerables es esencial. Cabe destacar la relevancia de los arrendatarios, ya que a menudo enfrentan obstáculos para beneficiarse de las mejoras energéticas debido a la falta de control sobre su vivienda y la preocupación por el aumento del alquiler, mientras que para los propietarios el ahorro energético no resulta una verdadera ventaja [225], [226]. Por otro lado, estos nuevos modelos de negocio y financiaciones pueden abrir el desarrollo de nuevos mercados y puestos de trabajo [227].

Otro aspecto fundamental es comunicar y valorar de manera efectiva los múltiples beneficios de la descarbonización para fomentar su adopción generalizada. Aunque el ahorro en los costes energéticos suele presentarse como el principal incentivo, la propuesta de valor de la descarbonización abarca un espectro más amplio de ventajas, como mejoras en la salud, y el confort, resiliencia frente a los escenarios climáticos futuros, reducción de la contaminación y un aumento en el valor de las viviendas [226]. Sin embargo, estos beneficios no energéticos suelen pasarse por alto o subestimarse, especialmente entre quienes enfrentan restricciones económicas. Por ejemplo, certificados energéticos en España, no incluyen aspectos como las horas de confort logradas sin sistemas mecánicos de climatización, lo que resulta crucial para mitigar la pobreza energética estacional. Tampoco el CTE profundiza en indicadores más centrados en el bienestar térmico de los usuarios y estrategias que favorezcan soluciones pasivas. Alineado con esta idea, un desafío central es desarrollar métricas y herramientas que midan con precisión estos beneficios diversos. Dentro de estos se incluyen las mejoras en salud y seguridad al eliminar electrodomésticos a gas, lo que reduce la contaminación del aire interior y el riesgo de incendios, además de los beneficios en confort y

resiliencia derivados de un mejor rendimiento térmico y una calidad del aire interior superior [224]. Esto especialmente relevante para situaciones de pobreza energética o pobreza energética escondida, cuyo gasto energético es bajo por el hecho de no poder asumir su coste [187].

2.4. Conclusiones

Las estrategias de ahorro energético en la edificación son esenciales en la integración de planes de mitigación y adaptación al cambio climático, ya que se prevé un aumento generalizado de las temperaturas incluyendo eventos climáticos extremos más intensos, frecuentes y prologados. El calor extremo podría aumentar en las zonas interiores, que además se vería exacerbado en las zonas altamente edificadas como consecuencia del microclima urbano, donde en la actualidad vive aproximadamente el 75% de la población española.

Esta situación es especialmente preocupante en España, que presenta un parque residencial obsoleto, en el que se estima que sólo el 30% incorpora aislamiento térmico. Además, la pobreza afecta al 27% de la población, lo que está vinculado con una baja habitabilidad en las viviendas y cuenta con alto porcentaje de población envejecida, que demandan unas condiciones térmicas mayores.

El Pacto Verde Europeo junto con la reciente EPBD 2024/1275, tiene como objetivo renovar el 43% de los edificios existentes respaldado mediante iniciativas como la *RenvationWave* y los fondos *NextGenerationEU* y *REPowerEU*. En España, el PNIEC y la ELP promueven la rehabilitación de 1,37 millones de viviendas antes de 2030 a través de diferentes programas de ayuda de rehabilitación residencial y vivienda social. Sin embargo, para fomentar la mejora energética en los edificios existentes, no basta con un marco regulatorio adecuado, sino que también se requieren medidas específicas como incentivos, acompañamiento a los agentes y movilización de inversiones. Dado el largo ciclo de vida de los edificios y la baja tasa de renovación energética en la UE y en España, es esencial alinear políticas y medidas para garantizar los objetivos. La estrategia de descarbonización española para el 2050, establece como objetivos para alcanzar este fin la electrificación y reducción de la demanda, junto con la eficiencia energética y las energías renovables.

Para lograr la neutralidad climática en 2050, es fundamental que los consumidores desempeñen un papel activo en la gestión y reducción de la demanda a través de la implantación de estas soluciones de renovación energética de los hogares. Sin embargo, algunas de las limitaciones que justifican esta situación están relacionadas con el desconocimiento, la complejidad técnica y principalmente la poca accesibilidad y adecuación para los colectivos más vulnerables, que son los que más podrían beneficiarse de las ventajas de la rehabilitación energética.

Con el fin de transformar estos retos en oportunidades para la mejora de la sostenibilidad, condiciones de vida y el desarrollo de una economía verde circular, es esencial definir metodologías que permitan caracterizar exhaustivamente el estado energético, térmico y socioeconómico de los hogares actualmente y en el futuro. Relacionado con esto, la modelización energética y térmica de las ciudades facilita comprender las demandas energéticas, así como las posibles situaciones de estrés térmico de

las viviendas. Sin embargo, algunas de las barreras que reducen esta precisión en las herramientas de simulación en las ciudades y su combinación con parámetros socioeconómicos son:

- El uso de climas representativos de la ciudad, entre los que se incluyen los normativos, que no consideran las tendencias climáticas actuales en un entorno urbano, ni sus escenarios futuros.
- La aplicación de herramientas de modelado energético generalistas o detalladas, pero de alto recurso computacional, que dificultan tener en cuenta la perspectiva de bloque de manzana urbana, considerando al edificio, pero también la influencia de su entorno urbano más próximo.
- La falta métricas que vayan más allá de la perspectiva energética o reducción de GEI, sino también el análisis de las condiciones de habitabilidad, confort y salud, que son fundamentales en las situaciones de pobreza energética, pero que también pueden ser atractivos para otros colectivos. Estos enfoques podrían mejorar el bienestar y reducir la vulnerabilidad frente a temperaturas extremas, un problema que es especialmente relevante en climas cálidos como el de España.
- Metodologías de identificación de pobreza energética centradas principalmente en la información estadística, limitadas específicamente a áreas vulnerables o enfocadas en los consumos de calefacción, que limitan conocer el comportamiento real de los hogares ante los escenarios climáticos a nivel edificio para toda la ciudad.

Cabe destacar que pese a que las inversiones necesarias para conseguir este cambio de paradigma técnico, económico y de concienciación, pueda parecer costoso, las consecuencias de la inacción pueden ser mucho más elevadas. Especialmente las repercusiones relacionadas con el aumento de las facturas de energía, el envejecimiento de la infraestructura de vivienda, las consecuencias en el sistema salud, las muertes prematuras o la intensificación de los desastres climáticos.

Ante esta situación se concluye que es necesaria una metodología efectiva que permita identificar los hogares en los que la intervención energética es prioritaria ante los escenarios de cambio climático y que consecuentemente necesitan especial atención en el diseño de políticas de rehabilitación energética. Para ello, la evaluación energética desde la aproximación de Zonas Urbanas Homogéneas, junto con la combinación con otros factores socioeconómicos se presenta como una solución óptima.

3. La ciudad de Madrid como caso de estudio

En este capítulo se presenta y justifica la selección de Madrid como caso de estudio. Además, ahonda en el crecimiento y transformación de la ciudad. Este aspecto resulta vital para comprender las características de las viviendas, pero también la gente que lo habita. En este sentido, el urbanismo y las edificaciones se presentan como punto de unión entre las condiciones energéticas-térmicas de los hogares y sus condiciones económico- sociales. Para ello, se proponen los siguientes objetivos:

- i) Justificación de selección y presentación de la ciudad de Madrid (Sección 3.1.).
- ii) Estudio de la evolución urbanística de la ciudad contextualizado los principales hitos históricos y tratando de buscar patrones similares (Sección 3.2.).
- iii) Revisión de la evolución de las técnicas constructivas en España y su aplicación en la edificación madrileña para la caracterización energética (Sección 3.3.)
- iv) Avance y descripción de las normativas y regulaciones relacionadas con la habitabilidad de los hogares, centrándose en las condiciones térmicas (Sección 3.4.).

3.1. Características del municipio

Como se ha visto en la sección 2.1, España presenta un gran potencial de mejora en la rehabilitación energética de sus viviendas. En este sentido, Madrid se ha escogido por la combinación de diversos factores esenciales en las políticas energéticas.

La ciudad cuenta con más de 100.000 edificaciones residenciales, en su mayoría obsoletas y sin ningún tipo de aislamiento térmico. Por otro lado, su trama urbana es compleja, donde se mezclan tipologías edificatorias, morfologías y materiales muy diversos, lo que limita la caracterización térmica de las viviendas. Además, Madrid es la capital y la ciudad más grande del país. Alberga a más de 3,2 millones de personas siendo uno de los principales motores económicos de España, pero también mostrando una desigualdad territorial evidente.

A nivel climático, según la clasificación Köppen-Geiger, Madrid se corresponde con clima mediterráneo (Csa) caracterizado por temperaturas cálidas, con inviernos suaves y frescos, mientras que los veranos son calurosos y secos. Sin embargo, estas condiciones climáticas estivales, pueden estar verse exacerbadas en la época estival debido al microclima urbano y a su localización de ciudad interior, aumentando la vulnerabilidad debido a las situaciones de estrés térmico [228] [229].

Con el fin de hacer frente a estos retos, el Ayuntamiento de Madrid ha definido la Hoja de Ruta hacia la neutralidad climática en 2050 [230], donde el sector residencial se presenta como un factor clave. Entre las principales medidas se encuentra la descarbonización del mix eléctrico, con el objetivo de reducir su factor de emisión en un 85% para 2030, respecto a 2015, y alcanzar una eliminación total de emisiones para 2050, alineándose con los objetivos del PNIEC.

Esta hoja de ruta destaca la transición de los sistemas de calefacción convencionales al fomento de la mejora de la eficiencia energética en los hogares, impulsando el uso de electrodomésticos eficientes y la renovación de viviendas mediante mejoras en el aislamiento para reducir el consumo. El plan también incluye la incorporación de tecnologías inteligentes de gestión energética, como sistemas avanzados de calefacción, refrigeración e iluminación, junto con la promoción de energías renovables mediante la instalación de paneles solares para autoconsumo en edificios residenciales.

Para garantizar el éxito de estas iniciativas, se propone un enfoque integral que contempla incentivos financieros para facilitar la adopción de nuevas tecnologías, como bombas de calor, reconocidas por su alta eficiencia energética frente a los equipos tradicionales y calderas de condensación de alta eficiencia. También se subraya la importancia de sensibilizar a los consumidores mediante información clara y accesible, promoviendo una cultura de uso eficiente de la energía. Por último, se pone de manifiesto la relevancia de la colaboración con el sector privado, clave para desarrollar e implementar soluciones innovadoras.

3.2. Evolución y forma del urbanismo

El urbanismo en Madrid ha experimentado una expansión constante que ha superado los límites de los planes previstos, reflejando los cambios físicos, sociales, administrativos y económicos de cada época. A continuación, se detallan los principales hitos y factores que han influido en su desarrollo urbanístico.

Madrid amurallado y sus desbordamientos

En 1566, con la llegada de la corte de Felipe II, la ciudad medieval resultó insuficiente para la creciente población. Se reconstruyó la muralla, extendiéndola hacia el este para contener el desbordamiento poblacional, y se prohibió construir fuera de sus límites. Sin embargo, en 1590, solo unas décadas después de la reconstrucción de la muralla, Madrid ya había duplicado su extensión. Este crecimiento, en gran parte ilegal pero tolerado, se realizó a través de parcelaciones especulativas que volvieron a dar a la ciudad un contorno abierto y desorganizado. En 1625, Felipe IV, preocupado por razones sanitarias y fiscales, decidió ampliar la ciudad construyendo una nueva muralla para recoger el crecimiento urbano, eliminando los arrabales que se habían formado extramuros [231]. Consecuentemente, las manzanas en esta zona son de tamaños irregulares y sin planificación, con calles estrechas, creando un "efecto desfiladero" debido a la altura de las edificaciones (4-6 plantas). La escasez de espacios libres se compensa puntualmente con plazas de interés arquitectónico. La edificación es compacta y las viviendas son principalmente colectivas, con dimensiones de fachada de 12 metros y fondos de hasta 25 metros, origen de la maximización del espacio tanto en altura como hacia el interior de los patios, parcelas originalmente diseñadas para edificaciones de dos plantas y patio ajardinado detrás. Sin embargo, en 1868 se procede al derribo de la muralla actual para dar paso al crecimiento ordenado al rededor del casco antiguo y limitado por las rondas: El Ensanche

El Ensanche. Modernización y colmatación de rondas.

Hacia finales del siglo XIX, Madrid, al igual que muchas otras ciudades españolas, comenzó a consolidarse como un centro dinámico de modernización, facilitado por la llegada de inmigrantes que se desplazaban desde las zonas rurales. Las conexiones por carretera y ferrocarril aceleraron la urbanización, y las clases burguesas impulsaron la creación de barrios bien ordenados y urbanizados.

En este contexto, se diseñó uno de los proyectos urbanísticos más importantes de la ciudad, **el Plan de Ensanche de Madrid de Carlos María de Castro en 1860**. Este plan supuso un aumento significativo del área urbana, añadiendo casi 2.000 hectáreas al norte y noroeste de la ciudad, que empezaban en la red viaria conocida como las "Rondas" y se extendía hasta el actual paseo de Reina Victoria y las calles de Raimundo Fernández Villaverde, Joaquín Costa, Francisco Silvela y Doctor Esquerdo. El Ensanche estaba caracterizado por una cuadrícula ortogonal de unos 100 m de calles amplias y manzanas regulares, permitiendo la creación de grandes plazas y edificios públicos y arbolado en calles y bulevares. Además, se introdujo el concepto de patios interiores para mejorar la ventilación y las condiciones higiénicas de las viviendas. Originalmente, las alturas máximas permitidas eran de 20 m (cinco pisos y ático) en calles más anchas de 20 m permitiendo una ocupación del 85% de la manzana [232], [233]. Las edificaciones eran de medianería con patios interiores que conectaran con la calle. Por lo general eran edificaciones de 2/4 viviendas por planta, concebido originalmente con viviendas entre 60-100 m². Sin embargo, su desarrollo fue muy lento, prolongándose su parcelación hasta los años 1930. Por otro lado, la colmatación de estas edificaciones se produjo mucho después, pasado la mitad del siglo XX y de las edificaciones planeadas originalmente sólo se conservan algunos casos de edificaciones originales como la "Casa de las Flores". Por el contrario, ordenanzas posteriores permitieron elevar la altura y el aumento de la edificabilidad en patios interiores. Además, la mezcla de estilos empleada desde su planeamiento o la renovación de edificios originales produjo un incremento de la heterogeneidad arquitectónica. Estos hechos, sumado a la prioridad del tráfico rodado, concluyeron con una idea de Enchanche que difiere bastante de la idea original [234], [235].

Otro de los grandes proyectos que se planteó a principios del siglo XX fue en 1910 el inicio de la Gran Vía. Un proyecto que impulsó la infraestructura y se convirtió en un centro comercial de prestigio. Se construyeron bancos, hoteles, cines y oficinas, finalizando la obra en 1932 en la plaza de España [236].

Asentamientos no planificados. Más allá del Ensanche.

En paralelo a la construcción del Ensanche y La Gran Vía, surgía el desarrollo desorganizado en las periferias. La industria en crecimiento atraía a más trabajadores, pero los precios elevados dentro del Ensanche impedían que estos pudieran asentarse allí. A pesar de su innovación, el Ensanche favoreció principalmente a la burguesía, dejando a las clases trabajadoras fuera del desarrollo urbano controlado. Estas últimas se vieron obligadas a establecerse en suburbios desorganizados, que en ocasiones supera el crecimiento del Ensanche. Estas construcciones informales estaban formadas por viviendas de baja calidad, que carecían de servicios urbanos adecuados. De esta forma, fuera de los límites del Ensanche y con grandes claros entre sí estaba el extrarradio: Cuatro Caminos y Tetuán al norte; El Carmen, Prosperidad, La Guindalera y Ventas al noreste y este; Doña Carlota, Puente de

Vallecas a la vereda de la Carretera de Valencia; finalmente, al sureste se marcaba el camino de los Carabancheles y barriadas como Terrol [237]. El ayuntamiento trata de solventar este problema mediante el proyecto liderado por Núñez Granés en 1911, consistente en la definición de un trazado y la apertura de cierto número de calles y plazas del extrarradio, dejando a la iniciativa privada la urbanización de estos polígonos. Este hecho, lejos de solucionar el problema, acentúa los errores ya planteados con el Plan Castro, incrementando el precio del suelo y la edificación marginal y es finalmente rechazado por su falta de visión de la complejidad del tema [238].

Consecuentemente, dichos fragmentos urbanos, sin ningún tipo de planificación se caracterizan por una organización en manzana cerrada, ocupación compacta y falta de inversión en infraestructura, lo que provoca pendientes pronunciadas y desniveles, así como escasas zonas destinadas a la vegetación. La arquitectura es heterogénea con volúmenes irregulares. Las calles, generalmente, están rodeadas de antiguas casas de 1 a 4 plantas mezcladas con edificios más recientes de 6 a 8 plantas, resultado de un proceso continuo de sustitución y renovación urbana, que comenzó principalmente en los años 60. Debido a esto, las construcciones combinan, casitas rurales encaladas de teja árabe, viviendas de ladrillo visto con elementos neomudéjares y otras más modernas.

Por otro lado, para dar solución al problema de la vivienda para las clases trabajadoras se promulgó la primera **Ley de Casas Baratas en 1991**, que teóricamente buscaba incentivar la construcción de viviendas asequibles a través de exenciones fiscales y subsidios. Inspirado en la idea inglesa de la "ciudad jardín", el plan incluía la construcción de pequeñas viviendas unifamiliares con jardines. Sin embargo, el alto coste de urbanización desvió el enfoque hacia las clases medias, haciendo inasequible este tipo de vivienda para la clase obrera, lo que acabó favoreciendo la especulación inmobiliaria. La ciudad jardín supuso finalmente, pequeñas agrupaciones de viviendas unifamiliares conocidas como "hotelitos", localizadas fuera del núcleo de la ciudad, dotadas de pequeño jardín, promovidas como operaciones inmobiliarias de oferta de un tipo atractivo de vivienda para las clases medias, alternativo de los pisos en manzana de los ensanches, como Alfonso XIII de Madrid (1918). Ejemplos de este urbanismo son las colonias de El Retiro o Ciudad Jardín, formada principalmente por viviendas pareadas. A pesar de esto, algunas colonias obreras se desarrollaron, con características modestas y viviendas de ladrillo de una o dos plantas, como la colonia Mahou en 1914, la colonia Rosales en 1925 y la de la Fuente del Berro (1926) [239].

Planes urbanísticos de la II República. Integración social

Con la llegada de la II República, el **Plan de Extensión de 1933** fue diseñado para gestionar el crecimiento descontrolado de Madrid, ordenando la expansión hacia las zonas periféricas anteriormente mencionadas. Creando espacios urbanos más saludables y cuyo fin era atender a la creciente inmigración rural que llegaba a la ciudad. Proponía, además, la incorporación de zonas verdes (nuevas o abriendo existentes como la Casa de Campo, El Pardo, el Retiro y el campo del Moro), infraestructuras básicas, deportivas, escuelas. Su enfoque también incluía aspectos de integración social y mejora del medio ambiente urbano. Junto a éste, el Plan Regional, planteó una visión más

territorial, que trataba de organizar su conexión intermunicipal. Sin embargo, debido a la inestabilidad política y la falta de viabilidad técnica, este plan no se llevó a cabo en su totalidad [234], [238].

Autarquía franquista y crisis habitacional. Reconstrucción de la ciudad

La llegada del franquismo plantea a Madrid como la capital del “nuevo estado”, que recoge las edificaciones monumentales, pero también en un decidido impulso del desarrollo industrial. De esta forma la ciudad se enfrenta a la reconstrucción de una ciudad devastada después de la Guerra Civil y a un crecimiento desmesurado originado por el éxodo rural, que vio la capital como una gran oportunidad laboral [234].

En 1944, cinco años después de la guerra se publicó el primer plan de vivienda que proponía solución habitacional a 1.400.000 viviendas para suplir el déficit existente y resolver el incremento demográfico. Aunque la política autárquica intervencionista y nacionalista de la década de los cuarenta supuso un receso en la economía, y el plan de vivienda no se llevó a cabo. En este periodo las principales construcciones de vivienda social se destinaron principalmente a funcionarios, militares u obreros afines al sindicato de régimen. Bajo estas circunstancias, se publica el **Plan General de Urbanización de Madrid de 1946, conocido como Plan Bidagor** y apoyado por Junta de reconstrucción de Madrid (1939) formada por la Dirección General de Regiones Devastadas, Dirección General de Arquitectura y el Instituto Nacional de la Vivienda. Este plan proponía como puntos principales la capitalidad, la ordenación ferroviaria, plan de accesos rodados, la oración de la industria, la zonificación, la reforma del casco histórico y la terminación del ensanche. Además, este plan propuso una nueva estructura basada en núcleos satélites interconectados con el centro, marcando un punto de inflexión en el urbanismo español al plantear una expansión discontinua. Dicha estrategia de crecimiento intentaba mantener al proletariado en las periferias, limitadas del centro mediante grandes anillos verdes. Las nuevas barriadas obreras y la industria estaban en la periferia, evitando la mezcla con las clases burguesas del centro [234]. De esta forma en este periodo, se introduce el concepto de poblados, en los que se construye viviendas de carácter social, con bajos recursos y fomentados por diferentes planes de vivienda social.

El fuerte crecimiento industrial y migratorio de la década de 1950 provocó la rápida expansión de la ciudad, superando los límites establecidos por el Plan de 1946 y una marcada crisis habitacional. El Plan de Poblados Satélite (1953) plantea en los nudos industriales y de comunicaciones, dotarlos de grandes servicios y actuar como independientes, desarrollándose así San Blas, Manoteras, Palomeras, Villaverde, Peñagrande, Vicálvaro y Carabanchel. Además, el Estado implementó el **Plan de Urgencia Social de 1957**, que fomentaba la construcción de viviendas subvencionadas, destinadas principalmente a los sectores más desfavorecidos de la población urbana. En este sentido, los Poblados de Absorción tratan de sanear los suburbios chabolistas en los que habitaban casi 120.000 personas en los cinturones verdes que limitaban el Ensanche, proporcionando viviendas de alquiler. Se caracterizan por su austeridad y falta de equipamiento y combinan viviendas unifamiliares de dos plantas con bloques colectivos de 4 o 5 plantas. Este es el caso de los barrios de Fuencarral, Caño Roto, San Fermín, San Blas, Entrevías, La Elipa, Juan Tornero, Vista Alegre, Ventilla y Vallecas. Orcasitas. La

austeridad máxima y carente infraestructura se ejemplariza con los Poblados Mínimos, que también tenían como finalidad realojar a chabolistas, pero carácter temporal y siendo en su totalidad viviendas unifamiliares. Por otro lado, la experiencia de los poblados de absorción y en el espacio despejado por éstos, aparecen los Poblados Dirigidos, que tienen como objetivo absorber a la inmigración, esta vez en viviendas en propiedad. Supone una etapa experimental en la vivienda social española y trata de canalizar el potencial humano de constructores de su propia vivienda. Ejemplos de estos poblados son Almendrales, Canillas, Caño Roto, Entrevías, Fuencarral, Manoteras y Orcasitas [240].

Estas zonas periféricas se construyeron mayoritariamente con bloques abiertos racionalistas, de vivienda independientes, donde la volumetría de los edificios es autónoma respecto a las calles, y el concepto tradicional de alineación desaparece, dando lugar a los espacios interbloque, que idealmente se destinan a jardines y zonas peatonales. Esta idea de espacios abiertos es más vendible, se adapta mejor a los solares, supone menos gastos de infraestructura, ya que no se urbanizan los espacios interbloque. A pesar de las diferencias en las tipologías, es común que estas áreas se mezclen, generando un paisaje urbano híbrido. Sin embargo, la tipología predominante es el bloque lineal formado por hileras de unos 4-5 edificios de unos 5 pisos (no era obligatorio el ascensor), con dos viviendas pasantes por planta de 50-80 m², que fomentan la ventilación y soleamiento. Posteriormente, fue frecuente la incorporación de doble hilera, más económico, aumentando hasta 4 viviendas por planta ya que se incorpora un patio de luces interior para baños y cocinas [234]. En ocasiones estos bloques se alternan con viviendas unifamiliares en hilera y jardín de dos alturas, donde las calles son más estrechas, pero más acogedoras.

Desarrollismo y crisis de los 70. La ciudad fragmentada

A partir de los años sesenta el estado trata de rentabilizar la producción de vivienda, se elimina el intervencionismo del estado y se promueve la vivienda social desde la iniciativa privada. Además, Durante los años 60, el proceso de industrialización del país y la construcción masiva de viviendas marcó el periodo del desarrollismo. El **Plan General del Área Metropolitana de 1963** amplió la ciudad, incorporando 22 municipios más en su área de influencia que atenderán básicamente a una función residencial destinado a la clase obrera, carentes de dotaciones. Se introduce entonces el concepto de Área Metropolitana, bajo un modelo de crecimiento centrado en la especulación del suelo. Por otro lado, espacios centrales singulares como la Castellana, se destinan a acoger a las clases más altas y edificios representativos, como escaparte de la nueva ciudad moderna que se quiere transmitir. Sin embargo, este crecimiento descontrolado provocó un desequilibrio entre el desarrollo económico y social, con un déficit considerable de infraestructuras y servicios básicos en las áreas periféricas. Además, la reforma de los Arrendamientos Urbanos (1964) y la Ley de la propiedad Horizontal (1960), sentaron las bases para promover el acceso a la vivienda en propiedad, en contraposición del fomento del alquiler. La iniciativa privada busca la rentabilidad en menos suelo (viviendas en altura) y más cantidad (baja calidad), poniendo fin a la vivienda experimental social de los 50, aunque el problema de chabolismo y suburbios sigue existiendo. En este contexto, la validez del plan quedó pronto en entredicho. Continuas modificaciones caracterizadas por la excesiva calificación del suelo urbanizable,

consecuentemente alta capacidad residencial, no había una ordenación del tejido industrial clara, el 23% del parque residencial carecía de condiciones mínimas de habitabilidad y el déficit de vivienda seguía afectando al 12% (a pesar de que entre 1960-1980 se habían construido 2,6 viviendas por cada nueva familia) [241]. Esto mostraba los claros desequilibrios sociales, económicos y territoriales que implicaba el modelo desarrollista.

Con el modelo territorial, surgió el "crecimiento a saltos" promovido por construcciones inmobiliarias, que se apoyaban en la red de transportes existente y que buscaba suelo barato en los municipios exteriores, que dejaban elevados déficits de equipamiento e infraestructuras básicas. Así comenzaron a crecer en la segunda década de los años 60 municipios como Leganés, Getafe, Alcorcón, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz, Alcobendas y San Sebastián de los Reyes. Y posteriormente Móstoles, Fuenlabrada, Parla y Alcalá de Henares. El comienzo de la ciudad fragmentada. El resultado de este crecimiento era un núcleo apoyado completamente en la red de carreteras. Se constituye la M-30 como vía rápida de circunvalación y se incrementan los accesos a Madrid mediante autopistas, casi siempre congestionadas, donde las actividades industriales y residenciales se desarrollaban de manera descoordinada, dejando grandes espacios vacíos. Ante esta situación en 1970 el Ministerio de Vivienda Pública propone **decreto ley 7/70 sobre actuaciones urbanísticas urgentes**, conocido como el urbanismo concertado, para la creación de suelo residencial de forma rápida y al margen del planeamiento y ley del suelo vigentes, que fomentó la especulación urbanística de promotoras. La falta de servicios dotacionales, la dificultad para acceder a la vivienda, unido a la crisis del petróleo (1973), alimentó el movimiento vecinal por la mejora de la calidad de vida, uno de los agentes claves del desmoronamiento de la dictadura. Sin que se solucionase el acceso a la vivienda universal se pasó de una falta de viviendas al sobredimensionamiento como consecuencia de un decrecimiento demográfico, menos ingresos (inflación) y retraso de la independencia.

Las técnicas constructivas, la mayor disponibilidad de materiales y la búsqueda de la máxima rentabilidad del espacio por parte de las promotoras inmobiliarias llevaron a una construcción de edificios con características similares a las décadas anteriores, pero incorporando más altura. De esta forma fueron predominantes los bloques lineales y posteriormente entrados los años 70, torres, siendo en ambos casos edificaciones mucho más altas y con viviendas de mayor superficie (90-100 m²). Estas edificaciones estaban dotadas en su mayoría con garajes y comercios en las plantas bajas. Además, su alta densidad en altura permitía zonas verdes, peatonales y viales más amplios, que no siempre eran públicos, incorporando el concepto de urbanización privada [234].

Democracia y movilización social. Recuperación de la ciudad

Con el fin de la dictadura, los movimientos sociales comenzaron a cuestionar el enfoque urbanístico existente, destacando la preocupación por el medio ambiente y las condiciones de vida en áreas periféricas de Madrid. Consecuencia de estas reivindicaciones se pone en marcha el programa de Remodelación de Barrios (1976-1988). Sin embargo, en 1979, la ciudad presentaba un mosaico de barrios fragmentados con escasas zonas verdes y muchas viviendas precarias, especialmente en distritos como Puente de Vallecas y Usera. En un ambiente de crisis económica y estancamiento

demográfico comienza la redacción de un nuevo plan combativo, incorporando procesos de participación ciudadana e implicado por la sociedad, que derivó en 1985 en el **Plan General de Ordenación Urbana de Madrid (PGOUM 1985)**. Este plan, que con la llegada de la democracia ya sería competencia municipal, proponía luchar contra la segregación social en la ciudad, organizar el crecimiento para reducir los desequilibrios, mantener y proteger el empleo industrial en el municipio, frenar la terciarización del centro, mantener el carácter público de todo lo que lo tenga en la actualidad, defender los grandes espacios abiertos del municipio, limitar el acceso en automóvil al centro, mejorar la calidad ambiental del espacio urbano, proteger y rehabilitar el patrimonio edificado y reequipar la ciudad. Para ello, divide el territorio en dos grandes áreas: extensiones urbanas y actuaciones en la ciudad consolidada. En el primer caso trata principalmente de rellenar huecos mediante el uso del suelo urbanizable programado y estructurado a través de los Planes Parciales, muy delimitados y clasificados y que suponen un crecimiento moderado de la ciudad, acorde con la demanda poblacional. De esta forma, se propone la construcción de 39.282 viviendas en los dos cuatrienios del plan, siendo predominantes las viviendas colectivas frente a las unifamiliares (76%-24%) y de protección oficial frente a precio libre (87%-13%) y localizadas en los remates urbanos de la constituida M-40. Algunos ejemplos de estas áreas son Los Llanos, Valdebernado, Tres Olivos, Arroyo del Fresno o el Ensanche Este de San Blas. Dentro de estas extensiones urbanas, el suelo urbanizable no programado se limita al máximo. Por otro lado, las actuaciones dentro de la ciudad consolidadas se centran en definir Planes Especiales de Reforma Interior o Estudios de Detalle para zonas semi consolidadas resultantes de parcelaciones anómalas (marginales, chabolismo, etc.), áreas con baja urbanización donde se busca abrir nuevas vías o crear espacios verdes o pequeños vacíos resultantes de la obsolescencia de instalaciones como antiguas industrias. Ejemplos de este caso son Peña Grande y Peña Chica, la Avenida de Daroca, Colonia Fin de Semana, Palomeras Bajas, Glorieta Elíptica o Av. de los Poblados. Además, se realizaron importantes intervenciones en el casco histórico, con la creación de 6 Áreas de Rehabilitación Preferente, revitalizando barrios como Malasaña y Lavapiés. Las infraestructuras de transporte también se expandieron, aumentando la red de metro y modernizando la red de Cercanías.

Los planes parciales propuestos se fundamentan en la recuperación de un espacio urbano complejo en el que se supere la pobreza de significados y la monotonía en los ritmos que aquejan a los unifuncionales barrios-dormitorio contruidos en las décadas anteriores. La inclusión en un mismo sector de determinadas proporciones obligatorias de usos terciarios (comercio, oficinas), productivos (talleres o, en algún caso, industria), equipamientos públicos y servicios urbanos persigue la consecución de un espacio multifuncional que se asemeje al de la ciudad clásica. También la morfología predominante tiene reminiscencias clásicas del Ensanche planteado a principio de siglo XX, en cuanto a la recuperación de los trazados reticulares y de manzana cerrada con patio ajardinado, pero adaptado a las clases populares. En este caso es el propio edificio el que comúnmente ocupa toda la manzana (90 x 70 m²), dotado de grandes calles (15-20 m), bulevares (25-50 m) y zonas verdes. Por otro lado, estos nuevos ensanches se caracterizan por grandes dimensiones de los patios y fondo de las viviendas muy inferior, que recuerda más a los espacios interbloque y las viviendas pasantes de las

tipologías de edificación abierta. Aunque en menor medida, también fue frecuente la planificación de áreas de viviendas unifamiliares, que se presentan como grandes hileras adosadas, siendo la única tipología o bien, de forma mixta, en las que en muchas ocasiones sirvieron como perímetro de colmatación del borde del nuevo ensanche. Por otro lado, en las zonas urbanas consolidadas, aunque siguen en gran medida también la presentada anteriormente, están más condicionadas por el espacio, por lo que existen modificaciones de éstas eliminando alguno de sus lados, asemejándose de nuevo a los bloques lineales de la época anterior.

Liberalismo económico. “Todo urbanizable”

La expansión económica inesperada en España a partir de finales de los años 80, la internacionalización económica entre otros por la integración en la UE, provocaron una expansión de la demanda de espacio para actividades y vivienda, para los que el PGOUM de 1985 no estaba preparado. El aumento de la demanda habitacional llevó a un aumento de los precios de la vivienda, por lo que la población se vio obligada a trasladarse a las poblaciones periféricas de la capital, agudizando el problema de la movilidad. Este hecho ocurrió pese a los intentos previos de adecuación para diseñar un nuevo viario (incluía la actual M-40 y la M-50) y la Ley 8/1990 de Reforma del Régimen Urbanístico y Valoraciones del Suelo. Por otro lado, la degradación del Casco Histórico enfrentaba problemas de deterioro arquitectónico, pérdida y envejecimiento de la población y aumento de clases marginales. La presencia de industrias en zonas centrales complicaba la gestión del entorno urbano, causando problemas de tráfico y contaminación. Finalmente, se percibía un deterioro urbano y ambiental. Estos hechos, sumados al cambio de orientación política fundamentaron la generación del nuevo **Plan General de Ordenación Urbana de Madrid en 1997 (PGOUM 1997)**, que tenía como trasfondo: enfocar a Madrid como proyecto supramunicipal, generar nuevas centralidades con una atractiva mezcla de usos y actividades, bajo las ideas de viabilidad y flexibilidad en la gestión y ejecución.

Con la entrada del siglo XXI, este nuevo plan, persigue convertir a Madrid, en una de las grandes capitales europeas para lo que diseña una estrategia que persigue la expansión al "límite de capacidad", apoyado por la reforma de la ley del suelo de 1998, que modifica la normativa para la liberación de suelo rústico. Para el suelo urbanizable programado incorporado se definen los Programas de Actuación urbanística (PAUs) como promesa de nuevo suelo residencial, que incluyen desarrollos urbanísticos como Las Tablas, Sanchinarro, Montecarmelo, Arroyo del Fresno, Ensanche de Vallecas y Carabanchel. Esto preveía la incorporación de 75.000 viviendas y unas 10.000 hectáreas para nuevos desarrollos urbanos en la periferia sureste de la ciudad, con una importante reserva de suelos para las actividades económicas zonificadas. De forma complementaria, entre las grandes operaciones propuestas destacan la gran ciudad aeroportuaria de Barajas, la casa de campo del Este (Valdebebas), la ampliación de IFEMA, el corredor del Henares, la prolongación de la Castellana (Operación Chamartín), la operación Campamento, la recuperación del casco antiguo o la preparación de la ciudad como candidatura de los juegos olímpicos. Cabe destacar que, aunque de forma muy escueta, en este plan por primera vez aparece el concepto de la promoción de la eficiencia energética.

Desde el punto de vista morfológico, en esta etapa se continúa la urbana de los ya mencionados nuevos ensanches, esta vez con densidades más bajas, limitadas a 75 viv/ha según la Ley del Suelo Estatal LSCM 9-2001 para desarrollos en suelo urbanizable. Incluso en 2007 esta ley prohibió más de cuatro alturas (incluida planta baja y ático), que finalmente se suprimió en 2015. Además, la zonificación y especialización han supuesto carecer de una adecuada mezcla de actividades que implica zonas residenciales homogéneas, dependientes del automóvil y que plantean la dificultad de hacer ciudad con tan poca cantidad de suelo residencial. Esta misma ley del suelo obligó también a la reserva de un gran espacio dotacional como las superficies peatonales zonas verdes, que tienen que competir con las zonas privadas de los patios de manzanas, en el que la crisis del espacio público no tiene que ver con su escasez, sino más bien con su abundancia [242] [243], [244].

Crisis inmobiliaria y sanitaria

En el periodo de 1994-2007 la economía española tuvo una tasa de crecimiento de un 4%, que implicaron un aumento del PIB en un 70%. Gran parte del crecimiento se basó en la inversión inmobiliaria, favorecido por la flexibilidad de generar suelo urbanizable y la accesibilidad al crédito. En el año 2007 se produce la primera crisis financiera en EE.UU. que saca a relucir el fenómeno de las hipotecas basura e impacta notablemente en el resto del mundo. En España ocasionó el estallido de la burbuja inmobiliaria de los años anteriores, originando una crisis financiera y social que duró casi 10 años, debido en gran parte a la alta dependencia del sector de la construcción e inmobiliario. Este hecho implicó un parón casi total de la construcción de viviendas, que sumado a la crisis sanitaria del COVID-19, se ha prolongado hasta entrada la década del 2020.

Ante este nuevo escenario, el Ayuntamiento de Madrid publicó el **Compendio de las Normas Urbanísticas del PGOUM 1997 en 2024**, con importantes reflexiones y modificaciones para adaptar la normativa a las realidades sociales, económicas y territoriales actuales, para la configuración de un nuevo plan general. Esta nueva regulación fomenta la construcción de edificios y viviendas más confortables, accesibles, saludables, sostenibles y eficientes para las personas, establece un marco con mejores condiciones para las actividades económicas, y regula la mejora del uso de las dotaciones, equipamientos y los espacios vacantes del municipio.

3.3. Evolución edificatoria y técnicas constructivas

Conocer la evolución de los sistemas constructivos en España y más concretamente en la región de Madrid, permite caracterizar los edificios desde diversos puntos de vista. Entre ellos se incluyen el estructural, a través de sus elementos portantes, el de cobertura mediante sus cerramientos, el de acondicionamiento, gracias a la obtención de confort o incluso decoración, expresado mediante su imagen y aspecto. En este sentido, se analiza la evolución de la envolvente y edificación representativa de la ciudad de Madrid desde principio de siglo XIX hasta la actualidad con el fin de caracterizar térmica y energéticamente su parque edificatorio residencial.

Edificaciones históricas de entramados de madera <1920

La construcción del casco histórico pertenece a las primeras construcciones de la ciudad que se encuentran dentro de la almendra central, delimitada por aproximadamente por la antigua muralla de Carlos IV. Se trata de la parte más antigua de Madrid, donde hubo crecimientos medievales y posteriores hasta el siglo XVII. Sin embargo, de esta época sólo se conservan algunos edificios singulares, encontrándonos en la actualidad edificios en su mayoría de finales del siglo XVIII y principios de siglo XIX. La necesidad de nuevos ‘cuartos de alquiler’, en una ciudad cuyo crecimiento estaba limitado por la prohibición de construir fuera de la muralla, obligó a edificar sobre lo existente [245]. Estas nuevas construcciones denominadas casas ‘modernas’ o ajustadas a las Ordenanzas del Centro Histórico (1847-1892), eran de 5 o 4 alturas para calles principales y estrechas respectivamente. En este caso las construcciones eran de entramados de madera, con ladrillos como elemento de relleno, recubierto de zócalo de mampostería en la parte inferior y enfoscado el resto de la superficie, por lo que su estructura queda oculta y la apariencia externa es bastante homogénea [246]. El espesor de la fachada variaba a medida que aumentaba la altura como su distancia hacia el patio. Los muros de los sótanos, que según era costumbre sólo cubrían la primera crujía, hacían también de muros de contención, y la primera planta de la fachada principal eran entre 2 y 2 ½ pies de espesor (56-70 cms), dependiendo de la altura, mientras que si había muros de planta añadida se reducían hasta ¼ de pie con respecto a los de la planta baja [247]. Los muros del patio como los de medianería reducían también su espesor hasta 1pie (28 cms) [245]. La cimentación era de zanja corrida o pozos rellenos y arcos de piedra en su coronación [248]. El forjado de la planta baja es de bóveda tabicada de cañón de medio punto y el resto de las plantas se basaban en vigas y viguetas de madera con relleno de mortero, que podía estar aligerado con piezas cerámicas [249]. Las cubiertas también son de cerchas de madera par e hilera de ‘madera de a 10’, recubiertas de teja cerámica. Los huecos comienzan a proyectarse con un ritmo y tamaño de huecos, con marcos de madera y vidrio simple.

Industrialización de las estructuras de acero en la edificación 1920-1940.

Frente a la solución de entramados de madera, a principios del siglo XX la solución de muros de carga de ladrillo fue más frecuente, especialmente en las zonas de nueva construcción, como era el caso del Ensanche histórico. De manera similar, el muro de fábrica de ladrillo iba desde el zócalo hasta el alero, en los casos de altura elevada, también reduciendo su espesor a medida que aumentaba la altura. Esta solución se propone en fachadas, insistiéndose de forma notoria en las medianeras, a modo de cortafuegos. No obstante, con la industrialización de los perfiles metálicos a finales del siglo XIX, tanto de fundición como laminados, fue posible construir estructuras reticulares más livianas. Estas técnicas se pusieron en práctica a raíz de los años 20, especialmente cuando la altura de los edificios lo demandaba y su aplicación masiva comenzó años después con la llegada del hormigón armado. Los muros en este caso, que cumplían la mera función predominaban el uso del muro de un pie como hoja exterior, lo que proporcionaba mayor estabilidad y mejores propiedades físicas, tales como aislamiento térmico y acústico, así como mayor resistencia a la infiltración de agua de lluvia. En los edificios con mayores recursos, se complementaba con un tabique de hueco sencillo, formando una

cámara de aire entre ambos elementos, que en ocasiones puntuales incluían una manta de fibra de vidrio en la cámara. El uso de perfiles metálicos también se extiende en las estructuras horizontales, con la introducción de las viguetas de acero en doble T [247]. Aunque el abandono de la madera en las cubiertas es algo posterior y se continúa empleando a principios del siglo XX, la cubierta tradicional a dos aguas comienza a sustituirse por cubiertas planas ventiladas a “la catalana”, formadas por una solera cerámica apoyada en roscas de rasilla cuya función era doble, generar la pendiente y crear así una circulación de aire que desecaba cualquier filtración [250], [251]. De la misma manera, se empieza a incluir el vidrio doble en las ventanas y de forma más esporádica el aluminio.

Construcción “tradicional” basada en la fábrica de ladrillo (1940-1960)

Pese al progreso constructivo y los ejemplos de influencia arquitectónica vanguardista europea que se dieron en Madrid, la autarquía franquista de los años 40-60, limitó notablemente este progreso, especialmente en las zonas periféricas, con bajos recursos y destinadas principalmente a la vivienda social. Después de la Guerra Civil, la crisis habitacional, entre otras, amenazaba con afectar la estabilidad del régimen franquista en su tarea de reconstrucción nacional, debido a la realidad de una España totalmente aislada del exterior y con escasez de recursos. En ese sentido, el Reglamento sobre las restricciones de hierro en la edificación, prohibió a partir del año 1941 explícitamente el uso de acero en aquellos elementos constructivos que podían ser ejecutados con otros materiales, instando al diseño de proyectos basados en estructuras de fábrica de ladrillo y hormigón armado en años posteriores [252]. Este hecho generó un modo de construir durante más de 20 años, identificado como *tradicional* y que se siguió utilizando años después, especialmente en edificaciones de baja altura, pese a que la aprobación de la norma “Acciones en la Edificación” de 1962, ya no exigía esos condicionantes [253]. Además de esta normativa en 1944, se publicó la “orden por la que se determinan las condiciones higiénicas mínimas que han reunir las viviendas [254]”. Dicha normativa exigía unas características de ventilación y renovación del aire. Pese a que no se establece ningún valor mínimo de transmitancia térmica, sí que se mencionaba que se debía garantizar un aislamiento de la humedad y térmico mediante el empleo de sistemas constructivos adaptados a las temperaturas extremas y especificando el uso de cámara de aire o lámina impermeabilizante en viviendas en contacto con el terreno. En 1955 se aprueba la “Orden por la que se aprueba el texto de las Ordenanzas técnicas y normas constructivas para viviendas de renta limitada”, que incluye valores máximos de conductividad térmica, de nuevo sin especificar materiales o espesores. De esta manera, las edificaciones residenciales de los nuevos barrios obreros se basaban principalmente en muros de fábrica de ladrillo de 1 pie de espesor. Para la cimentación, la solución más repetida era la de zanjais corridas, normalmente de hormigón en masa y en menor medida a base de mampuestos y, en los casos de cruja intermedia a base de pilares, se combinaban con zapatas aisladas. Sobre esta estructura apoyaba una solera, que hacía de forjado del primer piso, careciendo de plantas de sótano. El resto de los forjados empleaban materiales cerámicos como elementos aligerantes, principalmente el ladrillo hueco dispuesto a soga o rasillones, nervios in situ y acabado con una losa superior de forjado se ejecutaba de 4 o 5 cm de espesor. Respecto a las cubiertas, fue bastante común el uso de la cubierta inclinada. En los primeros años de la autarquía mediante pares e hilera de madera sobre tablero de ripia o el uso

de tabiquillos palomeros para la formación de pendiente sobre los que se apoyaba una rasilla cerámica y en ambos casos el acabado era de teja árabe recibida con mortero. Posteriormente se hizo más frecuente el uso de la cumbrera y las vigas de apoyo de hormigón armado, relleno cerámico y capa de compresión sobre el que se recibían las tejas. Finalmente, los huecos, limitados en su mayoría a 1,00 o 1,20 m, eran de vidrio simple de 2-3 mm y la carpintería usada en los primeros años fue madera [253], [255], [256].

Popularización de las estructuras reticulares de hormigón armado (1960-1980)

Aunque a principios de los años 60, la construcción “tradicional” sigue teniendo mucha influencia de edificaciones, principalmente en edificaciones en torno a las 5 plantas, ésta comienza a combinarse con edificios de más alturas, en torno a las 10 plantas. Este hecho, tiene su origen en la privatización de la construcción de vivienda pública, que buscaba la máxima rentabilidad, la popularización masiva del uso de estructuras de hormigón armado, que promovió las estructuras reticulares en cimentaciones, vigas y pilares. A partir de los años 60 se generalizan los forjados unidireccionales formados con viguetas prefabricadas, entrevigado de doble rosca de rasilla e intradós plano mediante la ejecución de revoltón de ladrillo sencillo o bovedilla cerámica. En 1969, se actualiza la Orden emitida en 1955 con nuevos valores de conductibilidad de muros y cubiertas, así como obliga a incluir cámara de aire en el primer forjado para viviendas en planta baja. Los cerramientos de fachada, que ahora únicamente son un elemento de cerramiento, y la generalización del uso de sistemas electromecánicos a raíz de los años 70 permitió reducir su espesor considerablemente, disminuyendo el coste de material y permitiendo mayor superficie útil. Para garantizar unos mínimos de estabilidad, aislamiento e impermeabilidad, se recurre al cerramiento de doble hoja, en el que la hoja exterior suele ser de ½ pie de ladrillo perforado separado de una cara de aire del trasdosado interior de ladrillo hueco doble o simple. Esta solución constructiva está asociada a ciertos problemas en la unión estructura fachada, como la aparición de puentes térmicos, grietas al reducirse el espesor producidos por los movimientos elásticos de la estructura que facilitan la filtración del agua y aumento de la permeabilidad. Por otro lado, a excepción de las viviendas unifamiliares, la proliferación del uso de la lámina impermeable extendió su uso en las cubiertas planas, sin cámara, en la que la formación de pendiente se consigue con morteros aligerados, que también estuvieron asociados a ciertos problemas de filtración [257], [258]. Los huecos, ya no están limitados a los muros de carga, por lo que pueden ser de mayores dimensiones, usando comúnmente perfilera de hierro sin rotura de puente térmico y vidrio simple.

Introducción obligatoria del aislamiento térmico (1980-2006)

A finales de los años 70 se definen las Normas Básicas de la Edificación (NBE) que regularon la forma de construir de este periodo. Éstas incluyen el uso del hormigón armado para estructuras reticulares, muy populares en estas décadas y que lo continúan siendo hoy en día. Se populariza el uso del forjado sanitario, formado por viguetas prefabricadas o de acero, bovedillas cerámicas y capa de compresión de hormigón armado, misma estructura que en el resto de las plantas. Uno de los hitos de estas NBE, es la publicación en 1979 del NBE-CT-79 sobre condiciones térmicas en los edificios, que regula por primera vez el uso del aislamiento térmico en la envolvente. De tal forma, en los muros exteriores se

instaura la doble hoja con la misma estructura anterior, pero incorpora una capa de aislamiento térmico, generalmente de poliuretano proyectado en la cara interior de la hoja exterior ½ de ladrillo perforado exterior, a la que le sigue la cámara de aire y trasdosado de ladrillo hueco. Por otro lado, la cubierta también incorpora material aislante, siendo frecuente el uso de lana mineral. El acabado es de teja para las cubiertas inclinada, principalmente unifamiliares y manto asfáltico en cubiertas planas que podría incluir grava o loseta, en viviendas colectivas. Además, en los años 90 comenzó a ser frecuente la cubierta invertida, que usaba materiales aislantes como el poliestireno expandido o extruido [259]. Las carpinteras son de aluminio principalmente, sin rotura de puente térmico, pero que sí incluyen vidrio doble.

Aumento de las exigencias térmicas de la envolvente (>2006)

Con la publicación del CTE en el año 2006 y sus posteriores actualizaciones, aumenta considerablemente las exigencias térmicas y eficiencia energética. Se tecnifican los elementos de la envolvente, en los que se usan varias capas de diferentes materiales para mejorar las condiciones de habitabilidad. Para las fachadas, las opciones más comunes son las de doble hoja con aislamiento en la cámara de aire, que mejoran el aislamiento térmico. Aunque surgen otras soluciones como la de la cámara ventilada, o el uso de sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE), que permiten el uso del aislamiento continuo, sin rotura de puente térmico. Las cubiertas pueden ser planas invertidas, donde el aislamiento se coloca sobre la capa impermeabilizante para protegerla y prolongar su vida útil, o inclinadas con teja cerámica, con una capa de aislamiento bajo el soporte para mejorar la eficiencia térmica. En los suelos, se utilizan forjados sanitarios ventilados para prevenir problemas de humedad mediante una cámara de aire, o soleras con aislamiento térmico para minimizar la pérdida de calor hacia el terreno. Finalmente, las ventanas deben cumplir con los estándares de transmitancia térmica y suelen incluir carpintería de PVC o aluminio incluyendo la rotura de puente térmico, además de doble acristalamiento u otras soluciones como los vidrios bajo-emisivos, lo que mejora el aislamiento y contribuye a la eficiencia energética de los edificios

3.4. Mínimos de habitabilidad. Avance de la normativa

Antecedentes

En España, tal y como detallan los libros La Envolvente Térmica de la Vivienda Social de 1939 a 1979, el caso de Madrid y Sevilla se establecen una serie de hitos a nivel normativo para garantizar unos mínimos de exigencia térmica [256], [260]. Los primeros indicios se remontan a la 1911 con la Ley de Casas Baratas incorporándose modernos criterios higienistas [261]. Posteriormente, el Reglamento de Condiciones Técnicas de Construcción (1922), establece criterios que garanticen unos criterios esenciales de iluminación y ventilación. Aunque antes de 1940, ya había precedentes de muros de doble hoja, a nivel regulatorio, lo único que menciona el Instituto Nacional de la Vivienda (INV) en su Reglamento Interno de 1941 es unos mínimos de fachada (al menos 1 pie de muro de fábrica) [262].

Orden de 1944, condiciones mínimas higiénicas

A partir de 1944, la **Orden 29/2/1944 sobre las condiciones higiénicas mínimas** que han de reunir las viviendas, es el primer estándar que se acercó tangencialmente a la regulación de la habitabilidad y de aislamiento mínimo de los hogares, aunque con un carácter muy ambiguo y generalista, siendo los proyectistas quienes deben proponer dichas soluciones [26]. Su enfoque principal era la adecuada ventilación de las viviendas, regulando dimensiones mínimas, ventilación obligatoria en todas las habitaciones, altura libre de forjados y dimensiones mínimas de patios. También se prescribía la necesidad de separar el forjado de las viviendas en planta baja mediante una capa impermeable o una cámara ventilada. No se establecían requisitos específicos para el aislamiento térmico. Solo requería garantizar el aislamiento térmico "para proteger del rigor de las temperaturas de cada región" donde se encontraba el edificio, sin especificar zonas climáticas, características de los materiales, metodología de cálculo o valores límite de transmitancia térmica (W/m^2K) para los distintos elementos. Tampoco se establecían requisitos sobre la sección de la carpintería o el espesor del acristalamiento.

Ordenanzas Técnicas Constructivas para las "viviendas de renta limitada"

A través de las **Ordenanzas Técnicas Constructivas para las "viviendas de renta limitada" de 1955**, se establecen diferentes condiciones dependiendo de si se trata de viviendas pertenecientes al primer grupo, sin ayudas públicas y sólo cumpliendo las ordenanzas municipales, o al segundo grupo, con ayudas públicas y cumpliendo las normativas técnicas y características específicas de costes, dimensiones, urbanismo y arquitectura. Dentro de este segundo grupo se crea una 1ª, 2ª o 3ª categoría, con superficies entre los 80-200 m², 65-150 m² y 50-80 m² respectivamente.

Para las viviendas del segundo bloque se definen mínimos para garantizar una ventilación óptima y alturas libres de las plantas en viviendas entre 2,50 y 3,00 metros en entornos urbanos. Además, se exige que los bloques de nueva construcción tengan una anchura doble en su núcleo para facilitar la ventilación directa, y se fijan dimensiones mínimas para los patios en función de la altura del edificio. La altura de los bloques también se regula en relación con la anchura de la vía pública.

Dentro de esta norma, se hace la primera zonificación térmica del país considerando tres zonas: zonas climáticas extremas (grupo I), el resto de España (grupo II) y zonas climáticas benignas. Dependiendo de esta clasificación se exigían unos máximos de "conductibilidad" para muros, que se debían alcanzar con su espesor y cubiertas, que se conseguirían con el material de cubrición y elementos aislantes.

En 1969, se actualiza esta ordenanza que continúa en la línea de la norma anterior: mantiene alturas libres de planta, dimensión de los patios interiores en relación a la altura del bloque, establece un mínimo de 3 m en un lado del patio, para patios que no tengan habitaciones principales que ventilar, admite ventilación general por chimeneas de ventilación, prescribe la orientación sur de los edificios en la medida de lo posible o, en su defecto, la más favorable y mantiene la dimensión mínima de ventilación de cada habitación a una décima parte de su superficie. Se renombran las zonas climáticas en Zona I (anterior Grupo I) y Zona II (anterior Grupo II y zona benigna) y se actualizan las

“conductibilidades”, siendo más exigentes y sin especificar materiales, secciones constructivas o cálculos para llegar a ellas. El único requisito técnico detallado es la obligación de proporcionar una solera sanitaria en las viviendas que estén en planta baja. En ese momento no había soluciones prescritas para el acristalamiento y la carpintería.

Normas Básicas de la Edificación (NBE)

Además, en 1975 el Decreto 1940/75, se determina las medidas que deben cumplir las edificaciones para reducir el consumo de energía mediante el valor K_g en función del factor de forma. Posteriormente, las Normas Técnicas de Diseño y calidad de las Viviendas Sociales de 1977, limitan de nuevo la cubierta $1,74 \text{ kW/m}^2$ y se definen requerimientos para el uso de la calefacción. En este mismo año se definen las **Normas Básicas de la Edificación (NBE)** en 1977, cuando el Gobierno decidió crear un marco unificado para toda la normativa relacionada con la edificación. Estas normas eran de obligado cumplimiento para los agentes del sector. Para completar el marco regulatorio a las NBE se añadieron las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), que no tenían carácter obligatorio y constituían el desarrollo operativo de las NBE.

La aprobación en 1979 de la NBE-CT-79, Condiciones Térmicas en Edificios, marcó un hito en la construcción española. Por primera vez, se dedicó una norma específicamente al acondicionamiento térmico y al aislamiento térmico en viviendas, aplicable a todos los tipos, ya sea de alquiler libre o de protección oficial; antes solo existía la ambigua Orden de 1944. Su objetivo principal era la adopción de soluciones prácticas para reducir el consumo energético ante la subida de los precios energéticos, algo crucial en el contexto de la época después de la crisis del petróleo en 1973.

La norma fue eminentemente práctica ya que proporcionaba valores y tablas de conductividad térmica de diversos materiales, así como la inclusión de prescripciones básicas que deberían cumplir los aislantes, siguiendo con el concepto de K_g (transmitancia térmica global), un valor que consideraba todos los elementos verticales y horizontales en contacto con el exterior. También se introdujo una zonificación climática más detallada, dividiendo el país en 6 zonas, de la A a la E, considerando desde los climas más benignos hasta los más severos (sin las Islas Canarias). En función de éstos, se definieron unos valores máximos de transmitancia térmica, que continuaron con la tendencia descendente observada en las normas anteriores. Se recogen diferentes tipos de materiales, incluyendo la fibra de vidrio, lana mineral, perlita expandida, poliestireno expandido, o el poliestireno extruido.

Por otro lado, se adjuntó un mapa para calcular la condensación y se estableció la temperatura del terreno para calcular el aislamiento en las particiones en contacto con el mismo. Se distinguió entre edificios con calefacción y sin calefacción para los cálculos. Se clasificó la carpintería según su permeabilidad y estanqueidad al aire (A-1, A-2, A-3), y se estableció que la elección del tipo de carpintería debía ajustarse a la zona climática. Finalmente, también se especificó un anexo con definiciones y unidades de medida.

Código Técnico de la Edificación (CTE)

La Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE), publicada en 1999, buscó regular el sector de la construcción, actualizando las normas y definiendo las responsabilidades de los agentes implicados, así como los requisitos básicos que deben cumplir los edificios. Concretando los objetivos de esta ley 25 años después de la NBE-CTE-79, se publica el **Código Técnico de la Edificación (CTE) en 2006**, para establecer las exigencias de calidad en seguridad y habitabilidad, concretando los objetivos de la ley en especificaciones técnicas.

Dentro de este CTE, el Documento Básico de Ahorro de Energía (CTE_DB-HE) regula las reglas y procedimientos para un uso racional de la energía, reducir el consumo energético e introducir las energías renovables en la edificación. Su aplicación es de obligado cumplimiento para edificaciones nuevas, ampliaciones, cambios de uso o reformas. Las principales novedades que introduce es la limitación de la demanda de energía, para lo que establece un máximo de transmitancia térmica más exigentes en muros y cubiertas, pero también en suelos huecos y medianerías. Se amplían los climas incluyendo la severidad climática en invierno, pero también en verano. Se exige un porcentaje mínimo de contribución solar para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) y se incorpora una regulación más estricta de la eficiencia de los equipos de calefacción, refrigeración, ACS e iluminación. También se abordó por primera vez el concepto de "puentes térmicos". Por otro lado, el documento CTE-DB-HS, relacionado con la salubridad, especifica condiciones muy detalladas para el cálculo de la ventilación [263].

Este documento se actualiza en 2013 y posteriormente en 2019 y 2022, vigente hoy en día. Durante estos cambios, se han incluido algunas exigencias adicionales como la limitación del consumo de energía (de origen no renovable y total); se han limitado más los parámetros de transmitancia térmica de las envolventes, diferenciando también los casos de renovaciones; se ha retomado el concepto de coeficiente global de pérdidas (K_g) con un exhaustivo cálculo; se han detallado tablas de perfiles de uso y ocupación para el cálculo energético y se ha incluido una categoría de clima para las Islas Canarias.

Complementariamente, se ha enfatizado la utilización de energías renovables, especialmente en edificios de nueva construcción y pautas para garantizar el confort térmico y la calidad del aire interior, incorporado el cálculo y pruebas de la permeabilidad. Se promueven diseños de edificios más resilientes y eficientes, con una mayor consideración hacia la sostenibilidad en su ciclo de vida y el impulso a la monitorización y gestión digital de la eficiencia energética en los edificios

A modo resumen, la Figura 12 muestra la evolución urbanística residencial de los principales periodos mencionado anteriormente. Específicamente, la Figura 12a, localiza la distribución de los edificios dentro de la ciudad, mientras que la Figura 12b, muestra el incremento de edificios (barras) y población (puntos) para estos periodos, detallando los principales hitos históricos y normativos en materia de urbanismo y mínimos térmicos y de calidad del aire.

Por otro lado, la Tabla 2 muestra las principales características de dicha normativa térmica y de calidad del aire, destacando los valores de transmitancia térmica que aplicarían a la ciudad de Madrid.

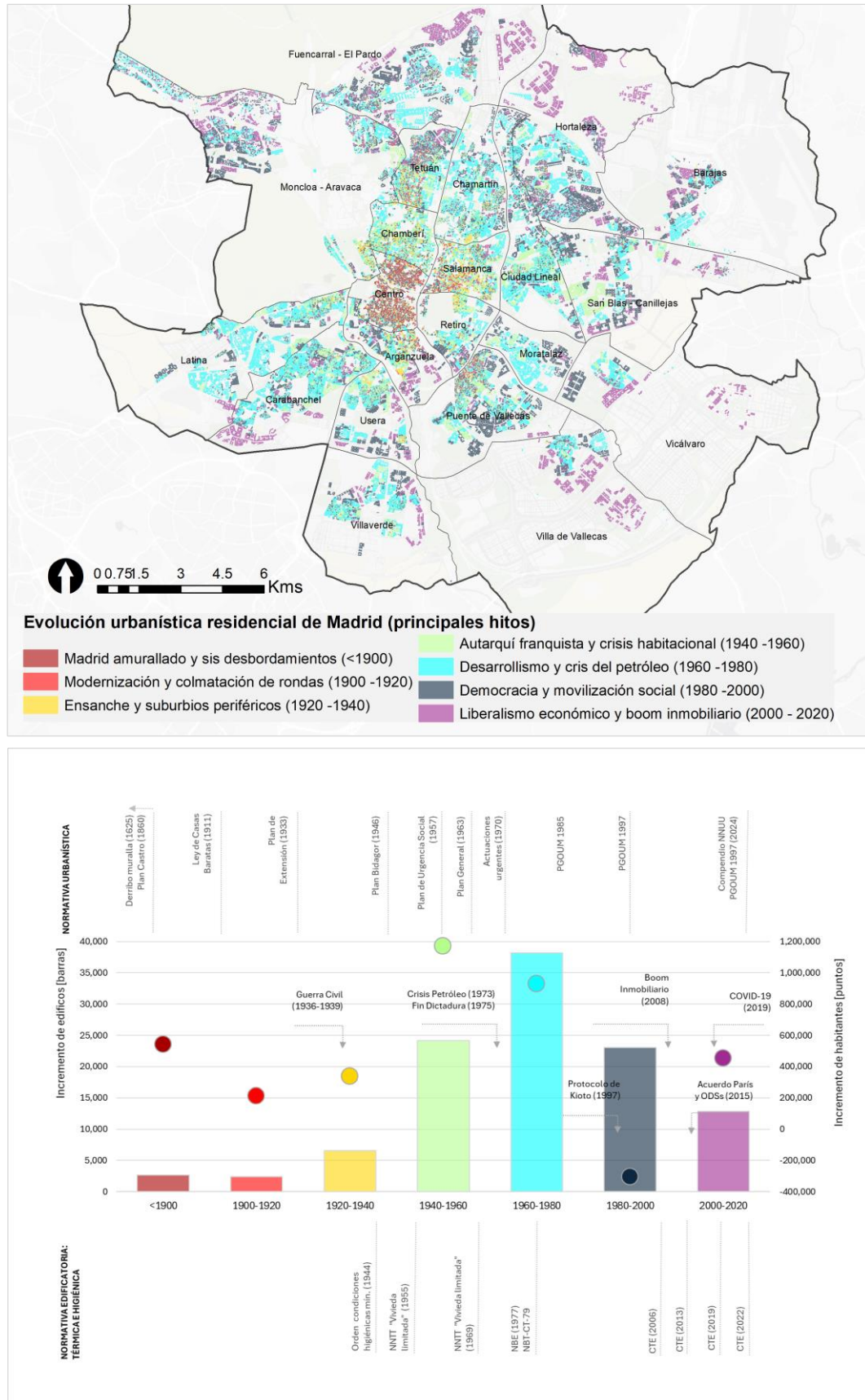


Figura 12. Evolución urbanística de Madrid (1900-2020). a) Localización de la edificación por años. b) Incremento del número de edificios y población. Elaboración propia a partir de [264], [265].

Norma y aplicación		Límite de la demanda					Especificaciones		
Orden 1944	Obra nueva	No se especifica zona climática					• Mínimos de ventilación, aunque muy generalista. • Distribución de estancias, patios y alturas mínimas. • Viviendas en planta baja aisladas del terreno con capa impermeable o cámara de aire		
NNTT 1955	Obra nueva de renta limitada	Transmitancia térmica envolvente, U (W/m²K)	Grupo I	Grupo II	Benigno		• Límites de mínimos de transmitancia térmica, pero sin definir cálculo • Orientación preferente sur • Especificaciones mínimas de ventilación • Especificaciones de materiales de muros, forjados y cubiertas		
		Muros	1,40	1,80	2,50				
		Cubiertas habitables	1,80	2,50	3,00				
		Cubiertas no habitables	1,40	2,50	3,00				
NNTT 1969	Obra nueva, protección oficial	Transmitancia térmica envolvente, U (W/m²K)	Zona I	Zona II		• Límites de mínimos de transmitancia térmica, pero sin definir cálculo • Orientación preferente sur y este • Especificaciones mínimas de ventilación • Especificaciones de materiales de muros, forjados y cubiertas. • Obligatoriedad de forjado sanitario			
		Muros	1,20	1,60					
		Cubiertas habitables	1,60	1,80					
		Cubiertas no habitables	1,20	1,80					
NBE-CT-79	Obra nueva	Transmitancia térmica envolvente, U (W/m²K)	V y W	X	Y	Z	• Mapa 1 (A-E, para el cálculo de Kg). Mapa 2 (V-Z, para límites de U) • Valor límite de Kg (coeficiente global de transmisión de calor) • Cálculo de transmitancia térmica, permeabilidad de huecos e infiltración		
		Muros exteriores (pesadas)	1,80	1,60	1,40	1,40			
		Cubiertas exteriores	1,40	1,20	0,90	0,70			
		Forjados sobre espacio abierto	1,00	0,90	0,80	0,70			
		Contacto no calefactados	2,00	1,80	1,60	1,60			
CTE 2006	Obra nueva Ampliaciones Reformas	Transmitancia térmica envolvente, U (W/m²K)	A	B	C	D	E	• Severidad climática verano e invierno • Cálculo de puentes térmicos, permeabilidad de huecos, infiltraciones y ventilación • Contribución mínima de fuentes renovables	
		Muros exteriores	1,22	1,70	0,95	0,86	0,74		
		Cubiertas exteriores	0,65	0,59	0,53	0,49	0,46		
		Suelos exteriores	0,69	0,68	0,65	0,64	0,62		
		Huecos	5,70	5,70	4,40	3,50	3,10		
		Contacto no habitables y medianeras	1,22	1,07	1,00	1,00	1,00		
CTE 2022	Obra nueva Ampliaciones Cambio uso Reformas	Transmitancia térmica, U (W/m²K)	a	A	B	C	D	E	• Límite del consumo de energía primaria no renovable y total • Límites de demanda y consumo diferentes para renovaciones y ampliaciones • Severidad climática verano e invierno • Valor límite de Kg (coeficiente global de transmisión de calor) • Los valores límite de transmitancia térmica de los elementos de la envolvente son distintos para reformas y cambios de uso • Cálculo de transmitancia y puentes térmicos; permeabilidad de huecos y ventilación • Contribución mínima de fuentes renovables
		Muros exteriores	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37	
		Cubiertas exteriores	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33	
		Suelos exteriores	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37	
		Huecos	3,20	2,70	2,30	2,10	1,80	1,80	
		Contacto no habitables y medianeras	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59	

Tabla 2. Principales características de la normativa española en materia de mínimos térmicos y calidad del aire. Se destaca los valores que aplicarían a la ciudad de Madrid

3.5. Conclusiones

En este capítulo ha justificado la selección de Madrid como caso de estudio y ha definido detalladamente cuales han sido la evolución de la ciudad de Madrid. En concreto se ha estudiado el urbanismo de la ciudad, el uso de las técnicas constructivas para la edificación residencial, así como estas técnicas y la morfología urbana se han visto modificadas por las normativas para garantizar unos mínimos de habitabilidad. De este estudio, se extraen unas formas de edificar similares que se pueden agrupar de la siguiente forma:

- El Madrid amurallado (<1900): Esta zona corresponde con el casco histórico de la ciudad con edificaciones hasta principios de 1900. Se caracteriza por tener una trama en manzana cerrada, irregular sin una planificación clara y con calles estrechas, que provocan un efecto desfiladero. Las edificaciones son aproximadamente de 5 alturas y cuentan con patios interiores. Sus construcciones combinan fábricas de ladrillo macizo con son de entamados de madera, que suele ser de más espesor en fachada, y se va reduciendo en los patios. Las cubiertas son inclinadas con estructura de madera.
- El Ensanche (1900-1920): Definidas en el Plan Castro, estas zonas cuentan con una trama urbana regular y planificada, con calles más anchas y arboladas. Viviendas originalmente de máximo 5 plantas con gran superficie de patios para la ventilación. Pese a que su planificación es anterior a 1900, su lento desarrollo ha hecho que sus construcciones difieran en gran medida de la idea original. Su calidad constructiva es generalmente alta y cuenta con muros de ladrillo macizo que incorporan cámara de aire y cubiertas planas catalanas.
- Asentamientos no planificados (1920-1940): Son áreas alternativas al Ensanche que surgieron en la primera mitad del siglo XX donde se asentaron principalmente las clases trabajadoras. Su trama se caracteriza por no tener una parcelación regular, con calles estrechas y sin apenas zonas verdes. Originalmente son edificaciones de baja altura, autoconstruidas con fábrica de ladrillo macizo y cubiertas inclinadas. En la actualidad se mezclan con construcciones recientes de mayor altura y técnicas constructivas diferentes.
- Colonias de “hotelitos” (1920-1940). Surgen a raíz de la Ley de casas baratas de 1911. Se caracterizan por tener una trama urbana de viviendas unifamiliares, en la periferia del Ensanche.
- Autarquía franquista (1940-1960). Estas zonas se planifican a raíz del Plan Bidagor, después de la guerra civil durante el periodo de la autarquía franquista. Durante esta época se construyeron más de 25.000 edificios y la población de la ciudad se incrementó en 1,2 millones. Son zonas ubicadas en un primer radio de la ciudad y corresponden a la idea de poblados satélites, de absorción, dirigidos y mínimos. Se trata de bloques de edificación abierta (lineal o de doble hilera), con espacios interbloque, de 4-5 plantas, que en ocasiones se combinan con viviendas unifamiliares en hilera, siendo ambas construcciones viviendas de pequeña superficie. Son construcciones con materiales limitados y basadas en ladrillo. Su homogeneidad de debe en gran parte a las

regulaciones de orden de 1944 de condiciones higiénicas y a las NNTT de vivienda de renta limitada, que fueron las primeras regulaciones claras de habitabilidad

- Desarrollismo y crisis de los 70 (1960-1980). Durante el desarrollismo franquista se promueve las construcciones de iniciativa privada, que busca una mayor rentabilidad. Se aprueba el plan metropolitano y el plan de actuaciones urgentes, que promueve el crecimiento a saltos. Se construyen más de 35.000 edificios, aunque la población disminuye, a consecuencia de la crisis del petróleo y la mayor edad de emancipación. Además de la edificación abierta de baja altura de la época anterior, a raíz de los años 70 los muros de carga se sustituyen por estructuras porticadas que permiten más altura y reducir el muro de fachada hasta $\frac{1}{2}$ pie, incorporando una cámara de aire. Por otro lado, la lámina impermeable fomenta la solución de cubiertas planas. Además, las NNTT de 1969 limitan la transmitancia térmica de los elementos constructivos y obligan a incorporar cámara de aire en las viviendas en contacto con el terreno
- Democracia y movilización social (1980-2006). El plan de 1985 busca colmatar la ciudad fragmentada hasta los límites de la M40 y dar solución habitacional a las clases con menos recursos. La población disminuye, pues mucha se ve obligada a trasladar a las ciudades periféricas porque no pueden asumir los costes. Se generan los planes parciales a raíz de los cuales surgen los nuevos ensanches de la ciudad que se caracterizan por edificaciones de manzana cerrada de baja altura con patio interior privado. También dentro de este plan se desarrollan áreas específicas para viviendas unifamiliares. Además, en esta época se aprueban las NBE- CT 79, que por primera vez obliga a incorporar aislamiento térmico.
- Liberalismo económico (2006-2020). El PGOUM de 1997 propone a Madrid como una de las grandes capitales de Europa. Persigue la expansión al límite de la capacidad, “todo urbanizable”. Propone programas de Actuación urbanística (PAUs), con la incorporación de grandes zonas urbanizables y áreas verdes. La morfología sigue siendo la de los nuevos ensanches. Cabe destacar que en este periodo se aprueba el CTE y sus posteriores mejoras. La crisis inmobiliaria de 2008 y la posterior crisis sanitaria COVID 19 ha limitado la construcción de viviendas hasta casi la actualidad.

4. Tendencias climáticas en un contexto urbano

Las condiciones climáticas son un aspecto esencial en la rehabilitación energética, puesto que el comportamiento térmico urbano depende en gran medida de dichas condiciones ambientales. Por ello, este capítulo tiene como objetivo principal el análisis del comportamiento climático de la ciudad de Madrid y sus implicaciones para el estudio térmico de la urbe. De esta forma, se presentan como objetivos parciales:

- i) Generación de una base de datos climática a partir de una campaña experimental de 15 años (2008-2023) con el fin de definir un clima representativo (TMY) para la evolución energética, que tenga en cuenta las tendencias climáticas actuales. A partir de este clima, se pretende estimar su evolución para los escenarios futuros en 2050 y 2080 siguiendo las proyecciones SSP (Sección 4.1.).
- ii) Evaluación de los resultados obtenidos para las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, radiación solar global horizontal y velocidad de viento considerando el TMY actual y sus proyecciones futuras. Además de su comparación con los climas actuales de referencia para la ciudad (Sección 4.2.).
- iii) Análisis del impacto de dicho TMY experimental y sus escenarios futuros, mediante diversos indicadores de impacto clave en la evaluación térmica a nivel climático, urbano y edificatorio (Sección 4.3.).

4.1. Base de datos climática

El desfase climático que presentan las bases de datos climáticas comúnmente utilizadas, debido a su desactualización o localización fuera de la ciudad, así como la falta de consideración a la hora de tener en cuenta las previsiones climáticas futuras, reduce la capacidad de los modelos para prever con precisión las necesidades energéticas y las condiciones de confort en el contexto de un clima cambiante.

Este es el caso de los archivos representativos de la ciudad de Madrid usados frecuentemente, como los MET, IWECC o SEWC, que no consideran las tendencias climáticas actuales de la ciudad, puesto que están basados en series temporales desactualizadas o que no tienen en cuenta el gradiente urbano [266], [267]. La red climática proporcionada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) destaca por la fiabilidad de la fuente de datos a largo plazo. Sin embargo, los puntos de registro dentro de la ciudad, así como el acceso a sus datos horarios es limitado [268]. A nivel municipal, la red de estaciones de vigilancia de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid ofrece diferentes estaciones meteorológicas distribuidas por la ciudad que pueden facilitar el análisis de la ICU, sin embargo, la gran mayoría han sufrido cambios de instrumentación o localización, lo que limita la obtención de una serie temporal a largo plazo, siendo más efectiva su comparación para el análisis de días representativos [269]. Además, no todas las estaciones de la red cuentan con los mismos criterios de medida, encontrando diferentes aturas de registro (a pie de calle o en cubiertas) o registro de variables meteorológicas [270].

Con el fin de solventar esta situación, algunos estudios se han centrado en la definición de años meteorológicos tipo de ciudad en un contexto urbano para la evaluación energética raíz de campañas de monitorización exhaustiva. Este enfoque se presenta como un instrumento clave para el análisis del comportamiento del edificio y de sus componentes [271]. El proyecto de investigación MODIFICA plantea un modelo predictivo del comportamiento energético de edificios de viviendas bajo condiciones de isla de calor urbana [272]. A raíz de este trabajo, Miguel Núñez-Peiró definió un modelo empírico para la caracterización la ICU en la ciudad de Madrid a través del registro horario de temperatura y humedad de diferentes puntos de la ciudad. Estos datos junto con el uso de redes neuronales permitieron la generación de diferentes archivos climáticos dentro de la ciudad en función de su gradiente térmico [273], [274]. Por otro lado, el CIEMAT, dentro de sus instalaciones ubicadas en Moncloa, cuenta con una red climática que registra datos de la principales variables meteorológicas desde el año 2008. El tratamiento y procesamiento de estos registros ha permitido la generación de una robusta base de datos climática horaria actualizada y que ha dado lugar a diferentes evaluaciones climáticas y de comportamiento energético en la ciudad [47], [269], [275].

Para este trabajo, se ha escogido como punto de partida los datos ofrecidos por la base climática del CIEMAT. Pese a que el estudio del modelo empírico de la ICU presenta grandes ventajas y detalle a la hora de evaluar el gradiente térmico de la ciudad, el presente trabajo centra sus objetivos en la evaluación energética y térmica de las diferentes morfologías urbanas ante nuevas tendencias climáticas. De esta forma, la selección de un único clima para la ciudad, pero representativo, actualizado y registrado en un contexto urbano facilita, delimita y optimiza el marco de trabajo.

Por ello, en este capítulo describe la generación de una base de datos climática a partir de los registros meteorológicos ofrecidos por el CIEMAT, donde se describe la campaña experimental de 15 años llevada a cabo en la ciudad de Madrid, así como su tratamiento y procesamiento, con el fin de generar un archivo meteorológico representativo tipo actualizado y evaluar su comportamiento futuro.

4.1.1. Campaña experimental

Para cuantificar las tendencias climáticas urbanas se ha desarrollado una campaña experimental que permite evaluar la evolución de las principales variables meteorológicas a largo plazo y que permite la posterior generación de un clima representativo de la ciudad.

Para dicho estudio se han utilizado las instalaciones totalmente equipadas que ofrece el CIEMAT en su sede de Moncloa (Madrid, coordenadas: 40,454, -3,728) [149], [276]. Esta infraestructura se basa en la monitorización meteorológica de 15 años de medidas (del 2008 a 2023) [275], con datos registrados con una frecuencia de un minuto. Las variables meteorológicas monitorizadas incluyen: temperatura del aire (T_a), la humedad relativa (HR), la radiación solar global horizontal (Gh) o la velocidad y dirección del viento (V_v y V_d respectivamente). Los sensores climáticos están duplicados e instalados en dos estaciones meteorológicas, que registran datos de forma simultánea del mismo lugar. De esta forma, cuando la estación principal no tiene datos, la estación auxiliar complementa a ésta, evitando posibles huecos.

Posteriormente, se ha generado una base de datos climática minutal, para la cual se ha realizado un filtrado y procesado de datos. El filtrado identifica y elimina valores erróneos o estadísticamente no representativos del comportamiento general de las variables medidas. En primer lugar, en un análisis preliminar se han eliminado los registros físicamente imposibles de acuerdo con los rangos de los sensores meteorológicos para cada variable medida. En segundo lugar, los datos estadísticamente no representativos de la estación analizada se han eliminado, definiéndose como atípicos. Para ello, se ha considerado el rango intercuartil calculado como la diferencia absoluta entre los percentiles 25 (q_1) y 75 (q_3), de forma que todos los registros cuya distancia sea inferior o superior a 1,5 veces el rango intercuartil serán determinados fuera de rango. Una vez realizado el filtrado y procesado de datos de la primera estación, los huecos existentes se han rellenado con los datos ofrecidos por la segunda estación, repitiéndose de nuevo el proceso.

Esta base de datos se ha utilizado para identificar diferentes patrones climáticos a lo largo del periodo de análisis, así como para definir un clima representativo y actualizado de la ciudad de Madrid. Para tal fin, se han calculado los valores horarios, estacionales y anuales de las principales variables meteorológicas (T_a , HR, Gh y Vv) identificando datos medios, medianas, máximos, mínimos y rangos intercuartiles.

4.1.2. Generación de Año Meteorológico Tipo experimental (TMY)

La generación de un TMY simplifica el análisis del clima de una zona, ya que transforma los datos climáticos históricos en un único año representativo a través de una serie de directrices. Para ello, se ha utilizado la base de datos climática actualizada generada anteriormente, definiendo un TMY experimental de la ciudad de Madrid.

En este caso, se ha considerado como referencia la norma UNE-EN-ISO-15927-4:2011 que define la creación de un año meteorológico tipo (TMY) para la evaluación del promedio de energía anual para calefacción y refrigeración [277]. Cabe destacar que el concepto TMY, al igual que la norma UNE-EN-ISO-15927-4:2011, busca un clima representativo medio de la ciudad, por lo que suavizan los climas y no se consideran eventos climáticos externos. Esta norma se basa en la concatenación de los doce meses meteorológicos típicos representativos del ciclo: el “mejor” mes de enero, el “mejor” mes de febrero, de marzo, etc. Para ello, se analizan por separado cada una de las variables de T_a , HR, Gh y Vv, escogiéndose aquellos meses cuyos valores medios diarios son los más próximos a la media del ciclo. Este proceso se hace mediante el cálculo de funciones de distribución acumulada (*Cumulative distribution function*, CDF) y la posterior aplicación de la estadística de Finkelstein-Schafer (FS) [278] para las variables principales (T_a , HR, Gh). Los pasos desarrollados para este fin se detallan a continuación:

- i) Valores medios diarios a corto plazo (*short-term*, ST): Se calculan los promedios diarios de las variables principales (T_a ST, HR, Gh) y secundaria (Vv) para cada uno de los años entre 2008 y 2023. Para asegurar la consistencia a lo largo de todos los años, se excluyen los días 29 de febrero de esta serie de datos.

- ii) Valores promedio para cada día del año a largo plazo (*long-term*, LT): Se calculan los valores promedio de las diferentes variables para cada día de todos los años. Esto implica, por ejemplo, un promedio de T_a para el 1 de enero utilizando los 15 valores diarios correspondientes a esa fecha desde 2009 hasta 2023.
- iii) Funciones de distribución acumulada (CDF) mensuales: Las funciones CFD muestran la probabilidad acumulada de que un parámetro específico alcance un valor diario determinado, tanto a corto plazo (CDF_ST) como a largo plazo (CDF_LT). El objetivo es identificar, para cada mes, aquel que, a corto plazo, más se asemeje al comportamiento proyectado a largo plazo, como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 13.

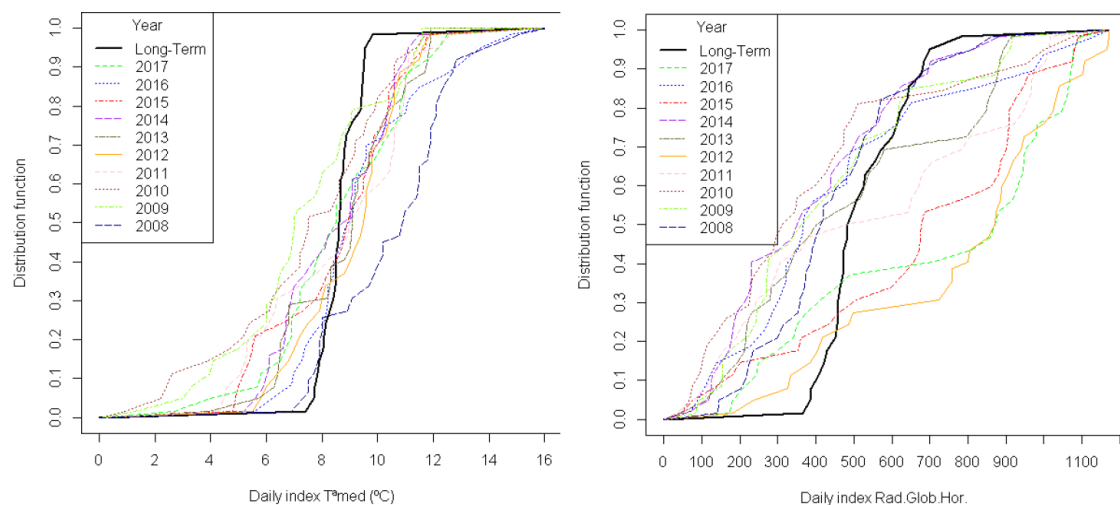


Figura 13. Representación esquemática a modo de ejemplo de las funciones CDF_ST y CDF_LT. Fuente [279]

- iv) Estadística de Finkelstein-Schafer (FS): De manera visual, no es posible determinar con precisión qué mes, a lo largo de estos años, sigue una tendencia más cercana al comportamiento a largo plazo. Para solventar esto se usa la metodología FS, que suma, para cada día, la diferencia entre la función CDF a corto plazo y la de largo plazo. Este análisis se hace para las variables principales (T_a , ST, HR, Gh). Posteriormente, se calcula la media para cada variable, considerando el número de días con datos disponibles en ese mes. Cabe destacar que, pese al trabajo de filtrado y procesado, algunos meses presentan huecos, por lo que se estableció el criterio de excluir para el cálculo del TMY los meses con al menos 5 días sin datos.
- v) Meses candidatos a TMY: La norma UNE 15927-4, al igual que otras metodologías similares [280], [281], [282], establecen que deben ser contemplados unos pesos (w_i) que ponderen la contribución de los diferentes parámetros climáticos en la selección del TMY. Para ello, se utiliza el promedio ponderado de FS (FS_{sum}) como establece la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, de tal forma que los tres meses candidatos a TMY serán aquellos cuyos valores FS_{sum} sean los menores [191]. En este estudio, ya que el uso principal del TMY es la evaluación energética y térmica edificatoria, las variables T_a , HR, Gh se ponderaron con el mismo peso ($w_i = 1/3$), tal y como establece T. Kalames et al [280].

$$FS_{sum} = w_1 FS (Ta) + w_2 FS (HR) + w_3 FS (Gh) \quad (\text{Ecuación . 2})$$

vi) Meses finalistas del TMY: Finalmente, considerando únicamente los tres meses candidatos seleccionados previamente, los meses finalistas que componen el TMY serán aquellos con menor desviación de la variable secundaria (Vv), correspondiendo con el menor valor entre las medias a corto y largo plazo. De esta manera, se obtiene definitivamente el mes utilizado en la elaboración del TMY.

Una vez generado el archivo climático experimental actualizado (TMY) se comparará con otros archivos basados en la metodología de año meteorológico tipo ampliamente utilizados en España para la localización de Madrid. En concreto se han seleccionado:

1. Los archivos climáticos MET: Estos datos de referencia para España están definidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE), dentro de su Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) [144], [283], [284]. Se basan en la caracterización de zonas sintéticas representativas en función de su severidad climática de invierno y verano. Fueron creados por el Ministerio de Educación y Ciencia y su uso es de carácter obligatorio para calcular la certificación del rendimiento energético de los edificios. Para la ciudad de Madrid, este clima se corresponde con la clasificación D3
2. Los archivos climáticos IWECC: Estos climas de referencia fueron creados por ASHRAE como los International Weather for Energy Calculation (IWECC). Su cálculo proviene de datos meteorológicos horarios registrados desde 1982 hasta 1999 y su popular utilización se debe en gran parte a ser uno de los climas de referencia de la herramienta EnergyPlus y los programas derivados de dicho motor de cálculo [141]. Para este caso se ha escogido el de la estación 082210, asociado como clima tipo para Madrid y cuya ubicación corresponde a Barajas.

4.1.3. Escenarios climáticos futuros (SSPs)

Los escenarios climáticos futuros se han definido siguiendo la aproximación de sendas socioeconómicas compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSPs). Las SSPs, surgieron en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC y permiten a los profesionales explorar cambios climáticos en diferentes escenarios futuros, asociados a las consecuencias climáticas de la actividad humana [285]. Están basadas en los resultados de los Modelos Climáticos Globales (*Global Climate Models*, GCMs) y su acoplamiento a través del *Coupled Model Intercomparison Project* en su sexta fase (CMIP6), basándose en la interacción de los procesos físicos y bioquímicos de la atmósfera, los océanos, suelos y mares de hielo. Se desarrollaron para complementar las Sendas Representativas de Concentración RCPs, generadas bajo la fase de modelado anterior (CMIP5), con diversos desafíos socioeconómicos para la adaptación y la mitigación. Por ello, a diferencia de los RCP, los escenarios SSP describen los factores humanos que influyen en las emisiones GEI y el forzamiento radiativo (la energía adicional atrapada en el sistema climático debido a los GEI). Además, estandarizan las características socioeconómicas que afectan las emisiones de GEI, indicando trayectorias sociales asociadas con diferentes niveles de calentamiento. Por otro lado, permiten evaluar la efectividad de las acciones para

cumplir con el Acuerdo de París, limitando el aumento de la temperatura global a menos de 2°C (SSP1-1.9) [286]. Los SSP se clasifican en cinco "familias" de acuerdo a dos ejes: desafíos para la mitigación y para la adaptación. El SSP1 (Sostenibilidad) tiene pocos desafíos para la mitigación y la adaptación, mientras que el SSP3 (Rivalidad Regional) enfrenta grandes desafíos para la mitigación y la adaptación. Los otros SSPs completan el espectro de posibles futuros: el SSP4 (Desigualdad) tiene grandes desafíos para la adaptación y bajos para la mitigación, el SSP5 (Desarrollo impulsado por combustibles fósiles) tiene altos desafíos para la mitigación y bajos para la adaptación, y el SSP2 (Intermedio) representa desafíos moderados para ambos.

Considerando este concepto, la presente metodología analiza, para el TMY generado a raíz de la campaña experimental, los escenarios SSP proyectados a 2050 y 2080. Para ello, se ha utilizado la herramienta *Future Weather Generator* [287]. Esta herramienta se basa en el método "morphing" que consiste en la transformación matemática del clima actual para que coincida con las variables proyectadas de un escenario de cambio climático. Se calculan a partir de modelos numéricos proporcionados por los GCMs, que representan los procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre usando de referencia los modelos CMIP. Frente a herramientas similares que utilizan este ajuste matemático "morphing", se ha seleccionado *Future Weather Generator* por presentar mayores ventajas, entre las que destacan su código abierto y modelos GCMs actualizados (basados en el CMIP6 que usa entre otros el EC-Earth3), lo que proporciona datos base y proyecciones futuras recientes, así como una mayor resolución espacial. En concreto los SSPs definidos por *Future Weather Generator* son:

1. SSP1-2.6: Sostenibilidad, "Camino verde": Las emisiones globales de CO₂ se reducen drásticamente, llegando al cero neto después de 2050. Las temperaturas se estabilizan alrededor de 1,8 °C más para finales de siglo. Coincide con un nivel de forzamiento radiativo de 2,6 W/m²
2. SSP2-4.5: "A mitad del camino ". Las emisiones globales de CO₂ no alcanzarán el cero neto en 2100. Las temperaturas aumentarán 2,7 °C a finales de siglo.
3. SSP3-7.0: Rivalidad regional, "Un camino Rocoso". Las emisiones globales de CO₂ se duplicarán aproximadamente con respecto a los niveles actuales para 2100. A finales de siglo, las temperaturas promedio han aumentado 3,6 °C. Coincide con un nivel de forzamiento radiativo de 4,5 W/m²
4. SSP5-8.5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles, "Tomando la autopista". Los niveles actuales de emisiones de CO₂ se duplicarán aproximadamente para 2050. Para 2100, la temperatura global promedio aumentará a 4,4 °C. Coincide con un nivel de forzamiento radiativo de 8,5 W/m²

Dicha herramienta, se alimenta de archivos climáticos generados en formato *EnergyPlus Weather* file (.epw), por lo que el archivo climático TMY se ha transformado a este formato a través del software de EnergyPlus "Weather Statistics and Conversions" [288].

Para facilitar el análisis se han considerado únicamente las proyecciones SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para los años 20250 y 2080, por ser los escenarios de impacto climático menor, medio y máximo respectivamente.

4.2. Clima representativo para el análisis edificatorio

Siguiendo el proceso descrito anteriormente, este apartado muestra los resultados obtenidos para la generación de un TMY y sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080 a partir de la base de datos climática del CIEMAT (2008-2023). Además, este TMY actualizado, se ha comparado con el actual archivo normativo MET y el ampliamente utilizado IWECC.

4.2.1. Temperatura del aire exterior

La Figura 14 muestra los resultados para la variable de temperatura del aire (T_a). El clima TMY presenta valores anuales medios de 16,7°C. A nivel estacional, los inviernos presentan promedios de 8,9°C, donde se alcanzan los valores mínimos de -2,8°C. En verano el promedio es de 25,9°C y se llega a máximos de 39,7°C. Por otro lado, en primavera y otoño tenemos valores medios de 18,1°C y 13,8°C respectivamente.

Comparado con el TMY, los otros climas utilizados actualmente, presentan valores medios de temperatura anuales más fríos, de 13,6°C y 14,4°C para MET e IWECC respectivamente que implican diferencias de 3,1°C y 2,3°C. Estas variaciones son similares en invierno y verano, pero destacan en las estaciones medias. Las diferencias de MET e IWECC respecto a TMY son de 4,1°C y 3,1°C en primavera, mientras que en otoño son de 3,0°C y 2,8°C.

Si analizamos las proyecciones del TMY, podemos observar que, a medida que los desafíos de adaptación y mitigación son mayores, la temperatura va aumentando, exacerbándose este comportamiento con el tiempo. Para el año 2050, las variaciones de las temperaturas anuales entre dichos escenarios son claramente superiores respecto al TMY, con valores medios anuales que van desde los 18,3°C a los 19,1°C para SSP1 y SSP5 respectivamente. Este hecho implica incrementos de temperatura respecto al caso base TMY de 1,5°C y 3,1°C. En el año 2080, estas diferencias son mucho más notorias, con valores medios anuales que van desde los 19,0°C para SSP1 a los 21,1°C para SSP5, 2,3 y 4,4°C superiores al clima TMY. A nivel estacional, podemos observar ligeros aumentos en los meses de invierno, con temperaturas en torno a los 9,8°C y 10,8°C en 2050 y 2080. Esta tendencia va aumentando gradualmente en otoño y primavera. Por último, en los meses de verano la temperatura media es mucho más elevada. En concreto, en la época estival, los valores medios de temperatura son de 28,5°C para SSP1 y 29,3°C para SSP5 en 2050 (ΔT_a de 2,6°C y 3,5°C respecto a TMY) mientras que en el año 2080 estas cifras aumentan de los 29,1°C a los 32,4°C para SSP1 y SSP5 respectivamente, lo que supone un ΔT_a de 3,3°C y 6,7°C respecto al TMY. Además, bajo el escenario SSP5, las temperaturas extremas podrían alcanzar los 44,2°C en 2050 y los 48,5°C en 2080.

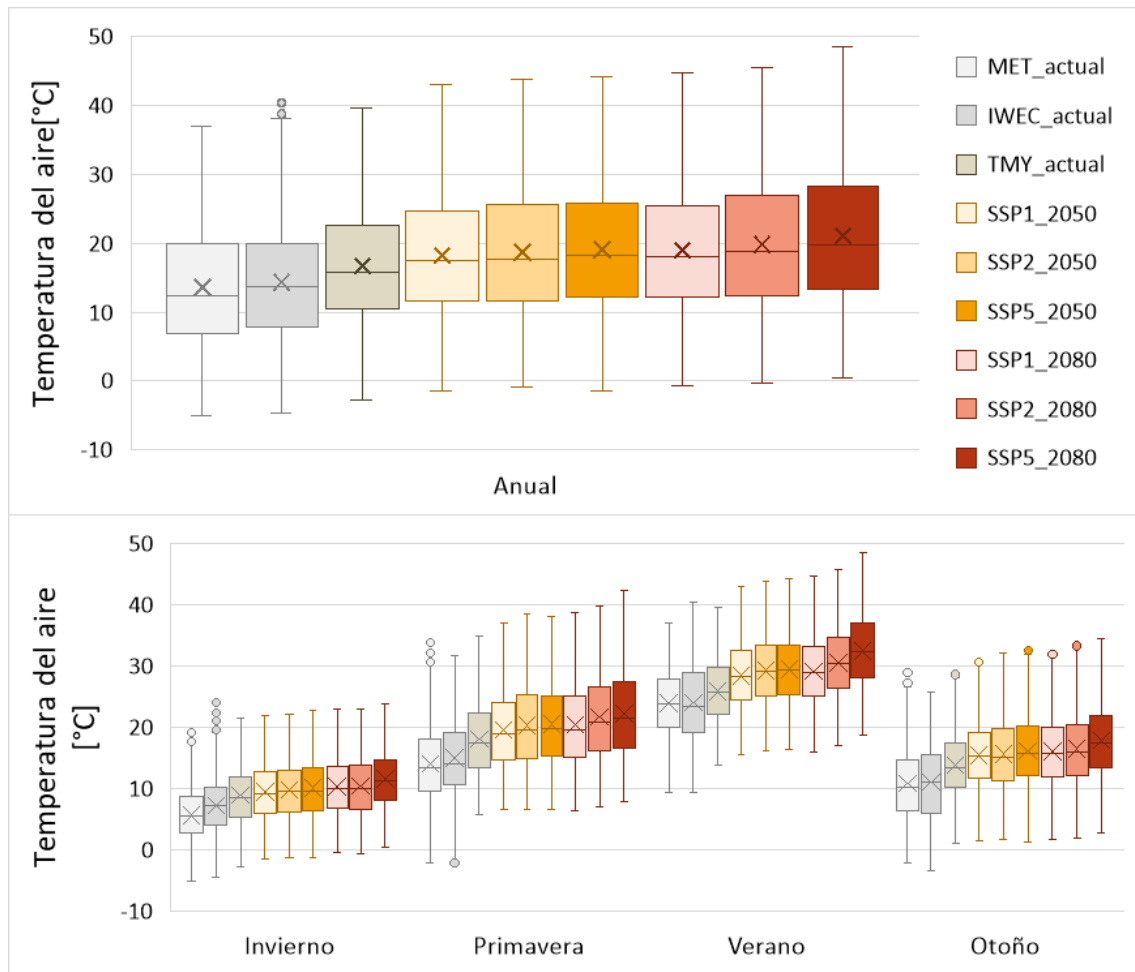


Figura 14. Datos de temperatura del aire (T_a) para los climas actuales MET, IWEK y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.

4.2.2. Humedad relativa

La Figura 15 muestra los resultados para la variable de humedad relativa (HR). En este caso el TMY presenta valores medios anuales de 48%. A nivel estacional, los promedios máximos ocurren en otoño, con porcentajes del 59%. En invierno, la HR presenta promedios anuales del 55% y en primavera, con cifras del 48%. Finalmente, en verano se observa la humedad media mínima del 32%.

Comparado con el TMY, los climas MET e IWEK, son más húmedos, especialmente el IWEK. Los valores medios anuales son del 58% y el 62% para MET e IWEK respectivamente que implican diferencias de 10 y 13 puntos. Estas variaciones son similares en primavera y verano, pero destacan en invierno con valores de 68% y 70% (12 y 14 puntos superiores a TMY) para MET e IWEK, al igual que en primavera, esta vez con cifras de 67% y 75% (12 y 20 puntos superiores a TMY).

Si centramos el estudio en la comparación del TMY respecto a sus proyecciones climáticas, se puede apreciar que a medida que los escenarios evolucionan de SSP1 a SSP5, la humedad se ve ligeramente reducida siendo algo más evidente a medida que pasa el tiempo. Para el año 2050 las variaciones de la humedad relativa son ligeras y presentan valores medios anuales de 48% a 46% para SSP1 y SSP5

respectivamente. De la misma forma para el año 2080 se observa que la HR media anual muestra rangos entre el 47% para SSP1 y los 45% en SSP5. Desagregando estacionalmente estos datos, las cifras más altas se encuentran en otoño, en torno al 65%, con humedades relativas muy similares para todos los SSPs y años, y siendo prácticamente iguales que las del actual TMY (ΔHR de 1%), seguido por las HR de invierno y primavera. Por otro lado, en verano encontramos los valores más bajos, siendo más notables las diferencias. La HR para el año 2050 es de 31% en SSP1 y de 28% en SSP5 (ΔHR de 1% y 4% respecto a TMY), mientras que en el año 2080 las variaciones observadas van del 29% al 25% para SSP1 y SSP5 respectivamente (ΔHR de 3% y 7% respecto a TMY). Los valores horarios máximos y mínimos de HR son muy similares en todos los SSPs y años, en torno al 92% en invierno, mientras que en verano los mínimos horarios están en torno al 6%, ambas cifras prácticamente iguales que el TMY.

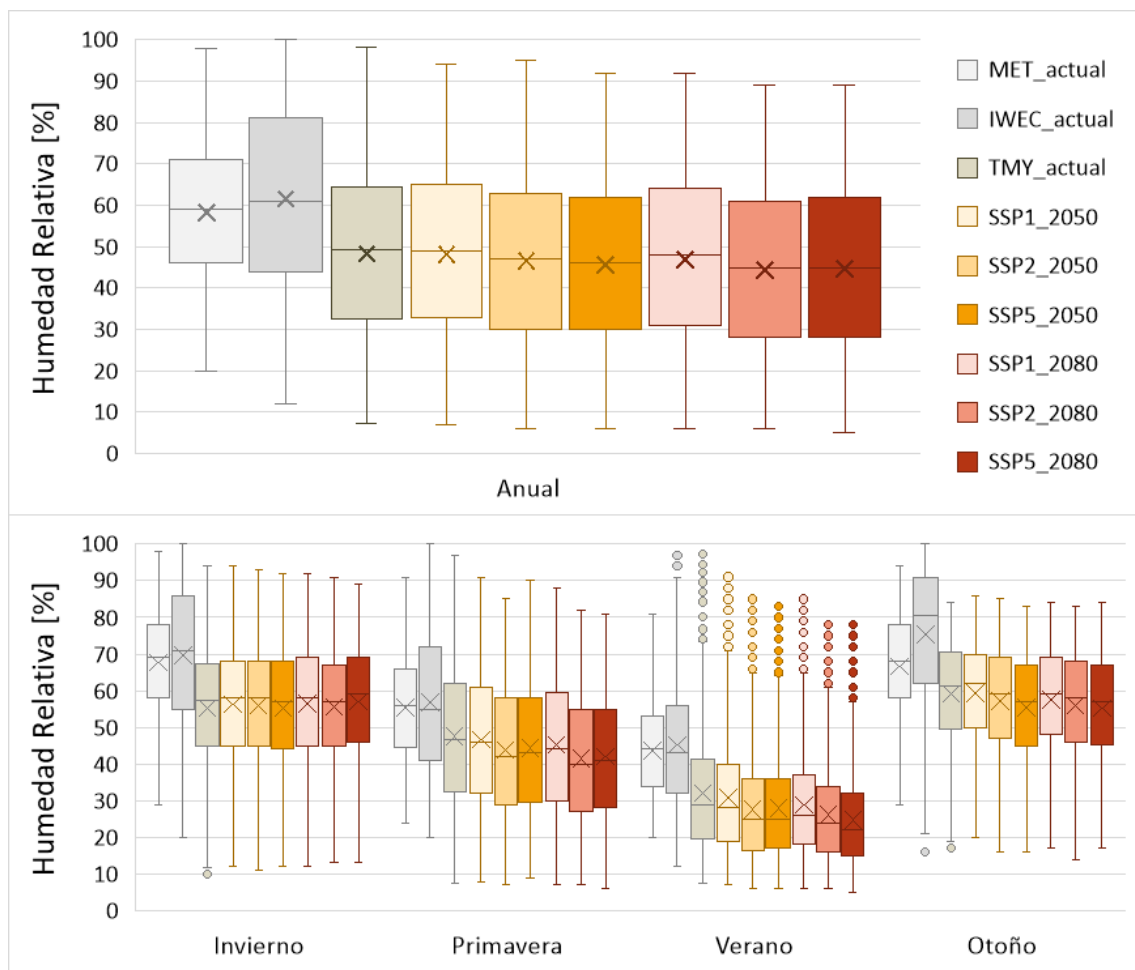


Figura 15. Datos de humedad relativa (HR) para los climas actuales MET, IWECE y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.

4.2.3. Velocidad del viento

La Figura 16 describe la velocidad del viento (V_v). Los valores medios anuales del TMY son de 1,6 m/s, aunque en este caso se combinan ráfagas con alta velocidad de viento con una alta frecuencia de valores inferiores a la media, como muestra la mediana y los valores atípicos. La mayor velocidad del

viento se registra en primavera, superando los 2,2 m/s, en verano estos valores son más próximos a la media anual, mientras que en otoño e invierno disminuyen hasta los 1,2 m/s.

Si contrastamos los datos del TMY con los climas MET e IWECC observamos grandes diferencias. A nivel anual, MET muestra valores medios de 2,9 m/s (casi el doble del clima base TMY), siendo muy notables las diferencias en las estaciones de otoño y especialmente invierno, donde se ven diferencias de hasta 1,6 m/s. Por otro lado, cabe destacar que, aunque la media anual del clima IWECC es de 2,4 m/s, 0,8 puntos superior a la media del clima TMY, existen elevados momentos de calma, menos en verano.

Por otra parte, los promedios anuales de velocidad de viento para los escenarios SSP, son prácticamente iguales que el clima TMY. Únicamente presentan ligeras diferencias en otoño para el escenario SSP5 tanto en 2050 como en 2080.

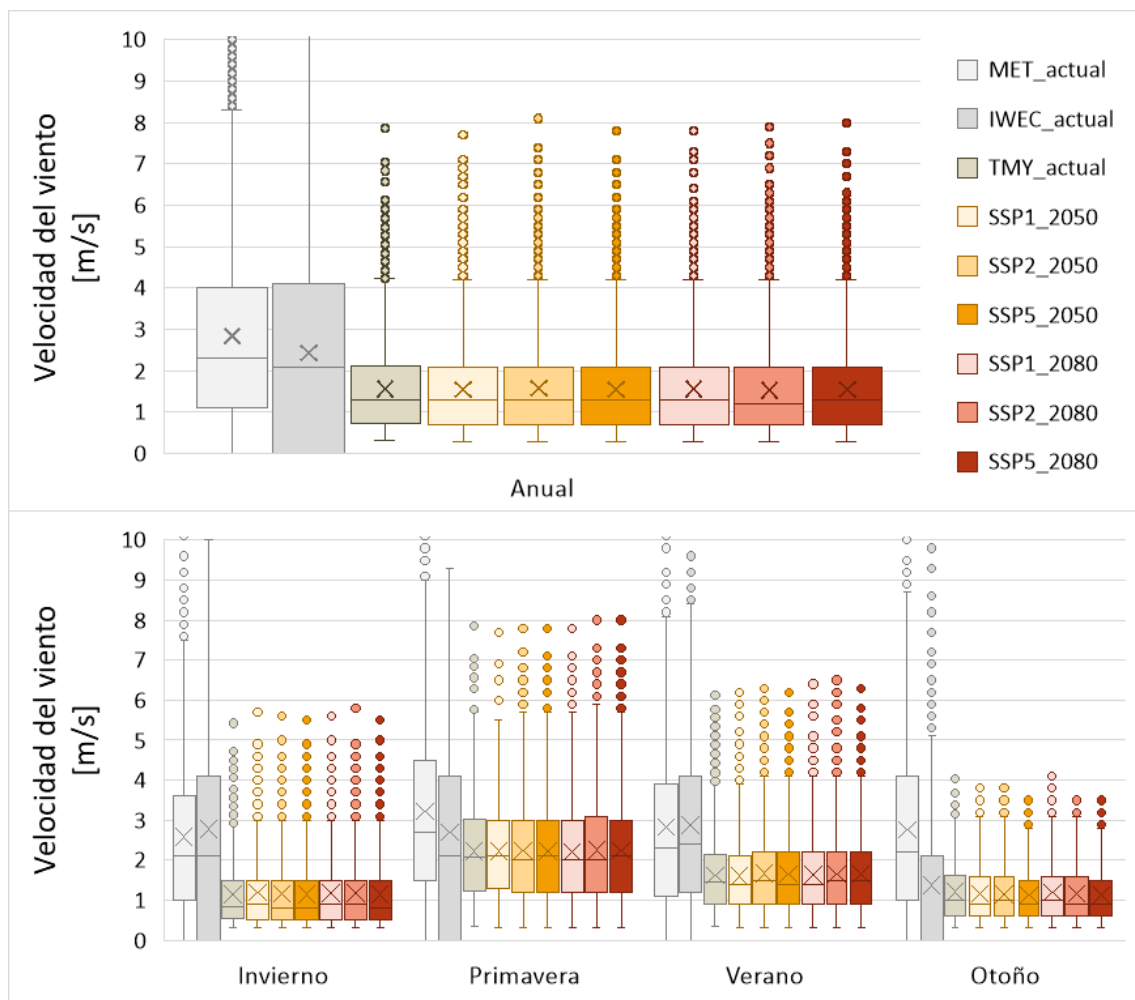


Figura 16. Datos de velocidad del viento (V_v) para los climas actuales MET, IWECC y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.

4.2.4. Radiación global horizontal

La Figura 17 muestra los valores de radiación global (Gh) diarios. Se ha tomado como referencia aquellos valores superiores a 10 W/m^2 , asegurando una altura solar mínima.

El clima TMY muestra valores medios anuales de 397 W/m^2 disminuyendo estos valores a 297 W/m^2 y 268 W/m^2 en invierno y otoño respectivamente. Por el contrario, en primavera y verano se muestran cifras de 452 W/m^2 y 510 W/m^2 respectivamente, donde también se alcanzan máximos de 1059 W/m^2 .

Los climas MET e IWECE tienen valores de radiación global horizontal de 365 W/m^2 y 377 W/m^2 respectivamente, 68 y 80 W/m^2 inferior a TMY. El comportamiento estacional es similar al que ocurre para el caso base TMY y cabe destacar el valor máximo de IWECE en verano de 1200 W/m^2 .

Por otro lado, si analizamos las proyecciones del clima TMY, se puede observar un aumento muy ligero de la radiación solar, sin encontrar apenas variaciones entre los escenarios SSP y años 2050 y 2080. A nivel anual las medias para el conjunto de los SSPs y años son de 415 W/m^2 . Siguiendo la misma tendencia anterior, la época estival presenta los valores medios más altos (525 W/m^2), seguido de las cifras mostradas en primavera, donde los máximos diarios están próximos a los 1.100 W/m^2 . Finalmente, en invierno y en otoño el valor medio estacional disminuye hasta los 284 W/m^2 .

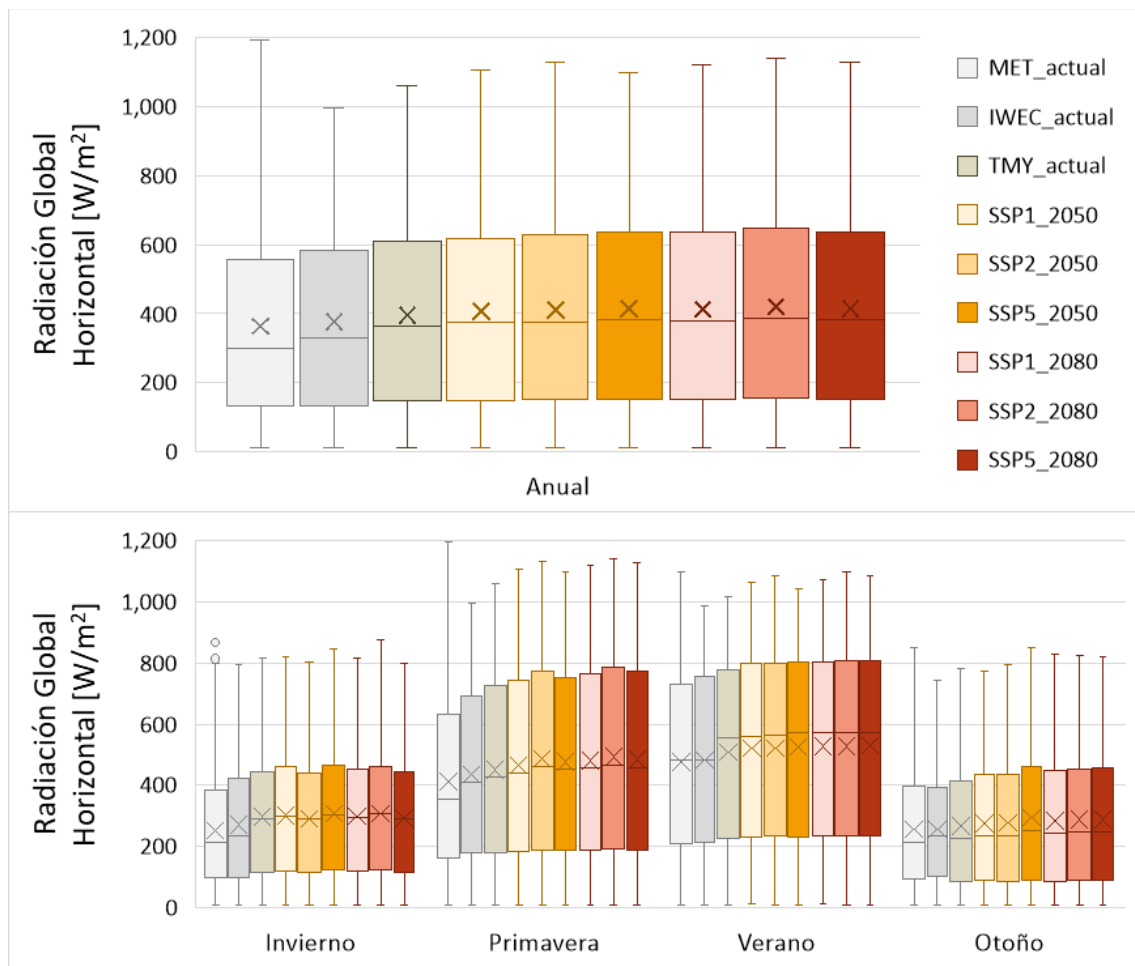


Figura 17. Datos de radiación global horizontal (Gh), para los climas actuales MET, IWECE y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.

4.3. Índices de impacto para la evaluación climática

En este apartado se ha definido el impacto que el clima TMY y sus proyecciones futuras puede tener a nivel climático, urbano y edificatorio. Para ello se han seleccionado una serie de índices simples, con los que se pretende estimar el comportamiento de las variables meteorológicas, el confort urbano exterior y la demanda energética edificatoria. Su cálculo sirve como una primera aproximación al posterior modelado energético y térmico más detallado. Los siguientes puntos describen los índices analizados y sus resultados.

4.3.1. Indicadores climáticos, urbanos y edificatorios

Una vez definidos los archivos climáticos para el estudio y comparación (MET, IWECC, TMYE y sus proyecciones), se ha estudiado su impacto potencial a nivel climático, urbano y edificatorio. Para ello se han utilizado diferentes indicadores relacionados con el cambio climático, la salud humana y la demanda de energía.

A nivel climático, esta evaluación se ha hecho a través del uso de los índices climáticos definidos en el proyecto ECA&D, que permiten cuantificar y armonizar las tendencias climáticas históricas, presentes y futuras [36]. Debido a su relevancia para este estudio se han definido los siguientes indicadores:

- El rango de temperatura extrema (ETR, *Extreme Temperature Range*) proporciona información sobre la variabilidad extrema de la temperatura en un área determinada. Su cálculo se establece mediante la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria para un periodo determinado.
- Las noches tropicales (TR, *Tropical Nights*) es utilizado para evaluar el impacto del cambio climático en las temperaturas nocturnas. Se define como el número de noches en un período específico (usualmente un año) en las que la temperatura mínima no desciende por debajo de los 20°C.
- Los días de verano (SU, *Summer Days*) analiza las condiciones de calor extremo durante el verano. Se define como el número de días en un período determinado en los que la temperatura máxima diaria supera los 25°C.
- Los días helados (FD, *Frost Days*) definen las condiciones de frío extremo. Se calcula contabilizando el número de días en un período determinado en los que la temperatura mínima diaria es inferior a 0°C.
- Media de la humedad relativa (RH, *Mean of daily Relative Humidity*) se define como la media de la humedad relativa diaria

A nivel urbano, se ha estudiado el confort térmico exterior, ya que es de gran importancia para la planificación urbana, el diseño arquitectónico, el diseño del paisaje, el transporte, el turismo o la salud urbana entre otros. El confort térmico exterior es un concepto complejo afectado por muchos factores, como el medio ambiente, el individuo y la psicología [37]. Entre ellos, los factores ambientales como la radiación, el viento, la temperatura o la humedad afectan directamente el equilibrio y la sensación

térmica del cuerpo humano [289]. Para el análisis en esta primera etapa, los índices empíricos y racionales como el HSI, WBGT, o el HI presentan una aproximación útil para conocer las características del entorno [176].

Dentro de estos índices, el índice DI, propuesto por Thom en 1959, se ha utilizado para evaluar el nivel de incomodidad térmica percibida por las personas debido a las condiciones ambientales a través de la temperatura efectiva [176], [290]. Este índice se caracteriza por su simplicidad en la evaluación, lo que facilita su cálculo comparado con otros métodos [291]. Para ello relaciona la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa mediante la siguiente fórmula (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$DI = T - (0.55 - 0.0055 \times RH) \times (T - 14.5) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde T es la temperatura de bulbo seco en °C y RH es el porcentaje de humedad relativa. A partir de estos valores se establecen unos límites de intensidad que facilitan la interpretación de este valor:

- vii) Intensidad 0: $DI < 21$: Confort.
- viii) Intensidad 1: $21 \leq DI < 24$: Menos de la mitad de la población siente malestar térmico.
- ix) Intensidad 2: $24 \leq DI < 27$: Más de la mitad de la población siente malestar térmico.
- x) Intensidad 3: $27 \leq DI < 29$: La mayoría de la población siente malestar térmico.
- xi) Intensidad 4: $29 \leq DI < 32$: Todo el mundo siente estrés térmico severo.
- xii) Intensidad 5: > 32 : Estado de emergencia médica.

Finalmente, a nivel edificatorio se ha utilizado el cálculo de grados-día para estimar la demanda potencial de calefacción y refrigeración de los edificios ante los escenarios de cambio climático. Además, este concepto también permite definir una primera aproximación generalista de cuál sería la intensidad de estrés térmico en caso de no usar sistemas de climatización, puesto que define los grados-día fuera de las temperaturas límite de confort. En concreto, este método consiste en cuantificar la acumulación de calor o frío a lo largo del tiempo mediante el cálculo de las diferencias entre la temperatura medida y un umbral de referencia durante un período específico [292]. El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, RD 1027/2007) define para España como condiciones de diseño los límites de confort interior valores de 23-25°C para verano y 21-23°C en invierno [293]. Por otro lado, la reciente normativa RD 14/2022 enfocada a definir diversas medidas, entre las que se incluyen aquellas destinadas al ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural, limita las temperaturas de calefacción y refrigeración a 19°C y 27°C, respectivamente [294]. Utilizando como referencia la normativa RD 14/2022, más acorde a los retos climáticos actuales, se han calculado los grados-día-hora de calefacción (HDD) para aquella acumulación de grados inferiores a 19°C, mientras que los grados-día-hora de refrigeración (CDD) se han cuantificado como aquellos superiores a 27°C.

4.3.2. Cuantificación del impacto climático

Basándonos en las metodologías descritas anteriormente, se muestran los resultados de los índices de impacto climáticos (ETR, SD, TR, FD y HR), urbano (DI) y edificatorio (HDD y CDD) para el clima TMY y sus escenarios SSP en 2050 y 2080. Además, como en el apartado anterior, estos resultados se han comparado con los climas MET e IWEK.

Indicadores climáticos, tendencia de las variables meteorológicas

Siguiendo la metodología definida en el ECA&D, la Figura 18 muestra Indicadores climáticos de Rango de Temperatura Extrema (ETR), Días de Verano (SU), Noches Tropicales (TR), Días helados (FD) y Humedad Relativa (HR), para los archivos climáticos MET, IWEK, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.

Para el indicador ETR se observa que el clima TMY tiene valores aproximados de 19°C. Destaca las grandes diferencias entre los climas alternativos al TMY actuales. El clima IWEK se caracteriza por presentar los valores máximos de 23°C, mientras el clima MET presenta los valores mínimos de 18°C. El escenario SSP1 en 2050 tiene un valor ligeramente inferior al TMY, sin embargo, para el resto de las proyecciones futuras, se prevé un aumento del ETR, especialmente para SSP2 y SSP 5 en 2050.

La cantidad total de días de verano (SD) actualmente para el TMY son 133, ligeramente superior a MET e IWEK, con 100 y 111 días respectivamente. A medida que los escenarios se van haciendo más desafiantes y las proyecciones se analizan a largo plazo, van aumentando los días de verano, 21 y 41 días de media para 2050 y 2080 respectivamente. Cabe destacar que los SD se dan prácticamente durante todos los días de verano, pero también son muy notorios en primavera y en otoño a partir del 2050 también empiezan a ser relevantes.

El total de noches tropicales (TR) para el clima TMY es de 44 días, valores muy superiores comparado con los climas MET e IWEK, que sólo representan en promedio menos de 15 días. Sin embargo, destaca el aumento para los escenarios SSP, duplicándose en 2050 para el mejor de los casos y en 2080 estas cifras serían de 92 días en el mejor de los casos (SSP1), pero alcanzarían aproximadamente los 115 días en SSP2 y SSP5 en 2080. Como es de esperar, estos números son muy elevados en verano, pero en 2050 y 2080 están presentes también en primavera e incluso en otoño.

En el clima TMY sólo encontramos 3 días helados (FD), pese a que para MET e IWEK estas cifras son elevadas en invierno, pero también en otoño, alcanzando valores para todo el año de 43 días en ambos casos. Los SSPs presentan valores insignificantes de FD, para todos los casos.

Finalmente, respecto al indicador HR, se observa que el clima TMY tiene valores medios anuales de 48%, mientras que MET e IWEK están más próximos al 60%. Los escenarios SSP muestran valores ligeramente inferiores a TMY y con variaciones mínimas entre escenarios y años. Sigue el mismo comportamiento que el analizado en la Figura 15, con valores máximos en otoño en torno al 60% y mínimos que se reducen hasta la mitad en verano.

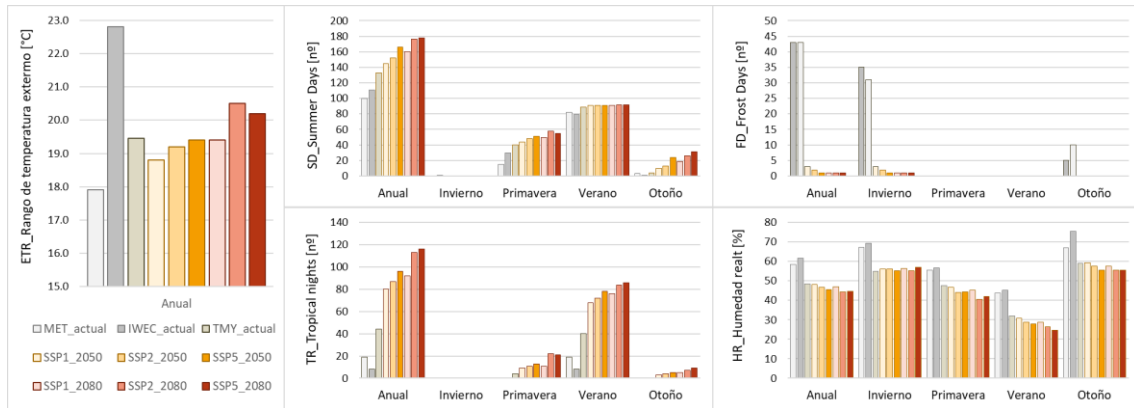


Figura 18. Indicadores climáticos de Rango de Temperatura Extrema (ETR), Días de Verano (SU), Noches Tropicales (TR), Días helados (FD) y Humedad Relativa (HR), para los archivos climáticos MET, IWE, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.

Indicador urbano, confort térmico exterior

El potencial impacto climático a nivel urbano ha sido cuantificado mediante el índice de Malestar por calor (DI). La Figura 19 muestra el porcentaje e intensidad de malestar por calor.

El archivo climático TMY presenta valores de confort anuales del 86% del tiempo, mientras que el resto de las horas existen situaciones de malestar por calor ligero y medio-bajo. Estos valores son ligeramente inferiores en MET e IWE, que presentan anualmente un 85% aproximado de confort. Por otro lado, en los escenarios SSP los valores de confort disminuyen hasta el 72% de media en 2050 y el 67% en 2080. Para SSP5 en 2080, la intensidad del malestar por calor es muy marcada, con máximos en el que la mayoría de la población sentiría malestar térmico.

A nivel estacional destaca una clara disminución de confort en verano, en el que el clima TMY presenta valores que solo llegan al 43% y con altos valores de intensidad baja y media-baja por calor. Esta situación se exacerbará para los escenarios SSP, desapareciendo casi la totalidad las horas de confort en SSP5 en 2080 y una intensidad por malestar que alcanza valores del 17% en los que todo el mundo presenta malestar. Destaca las horas e intensidad de malestar por calor en primavera y otoño.

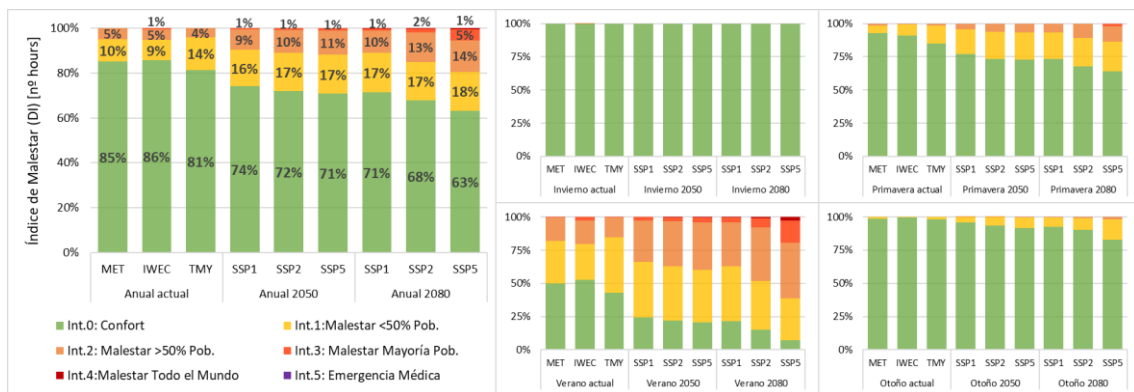


Figura 19. Valores del indicador urbano de confort térmico exterior Malestar por calor (DI) para para los archivos climáticos MET, IWE, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.

Indicador edificatorio, demanda energética.

Finalmente, este apartado trata de estimar la intensidad de las demandas energéticas edificatorias. La Figura 20 muestra los grados-día-hora de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD).

En el escenario actual TMY, se observa a nivel anual, valores altamente superiores de HDD respecto a CDD. Con valores cercanos a los 60.000 grados-hora para la calefacción y aproximadamente 35.000 para la refrigeración, lo que supone una proporción de 64-36. Sin embargo, para los climas MET e IWECC, esta proporción es de 72-28, con valores similares de grados días de calefacción, pero claramente inferiores en el caso de la calefacción. Por el contrario, en los escenarios futuros, se observa unos valores ligeramente inferiores de HDD, pero los CDD son notablemente mayores, con cifras que están en torno a los 6.000 y 7.000 en SSP para el año 2050 y 2080 respectivamente. Esta situación implica un cambio en la ratio HDD-CDD. Esta vez, las proporciones son similares en 2050 y claramente superiores en 2080, con ratios máximos en SSP5 de 38-62.

A nivel estacional, primavera muestra variaciones significativas. En el TMY hay unos valores bajos, inferiores a 10.000 grados hora, pero va aumentando en las proyecciones futuras, de tal forma que en 2080 la refrigeración en primavera será mayor que la calefacción.



Figura 20. Valores de los grados-día-hora de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD) para los archivos climáticos MET, IWECC, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se ha evaluado el clima actual en un contexto urbano a través de la definición de un clima representativo con el fin de conocer el comportamiento de las principales variables meteorológicas, pero también para su uso en el modelado energético edificatorio. Por otro lado, se ha estudiado su impacto a través de indicadores climáticos, urbanos y edificatorios. Además, se han evaluado las discrepancias entre otros climas utilizados para la ciudad de Madrid. Adicionalmente, se han analizado las proyecciones climáticas futuras en 2050 y 2080.

Las principales conclusiones destacan:

- Disponer de una base de datos climática horaria proveniente de una campaña experimental, con variables meteorológicas registradas durante 15 años (2008-2023) resulta especialmente ventajoso. Además, desde el punto de vista del procesado y filtrado de datos, destaca la combinación de dos estaciones de medida que permite el contraste y evita huecos vacíos.
- Esta base de datos ha permitido la generación de un archivo climático representativo (TMY) y actualizado para la ciudad de Madrid en un entorno urbano. Pese a que los climas representativos no consideran los eventos climáticos extremos que se reflejan en la realidad, se presentan como metodologías altamente ventajosas para analizar las necesidades energéticas y térmicas medias de la ciudad a través de su incorporación en el modelado energético.
- El clima TMY se ha generado siguiendo la metodología UNE-EN-ISO-15927-4:2011, basada en las funciones de distribución acumulada (CDF) y la posterior aplicación de la estadística de Finkelstein-Schafer (FS). Su cálculo ha permitido definir unos escenarios climáticos futuros más ajustados a la situación climática actual, basado en las proyecciones SSP para el 2050 y 2080. Además, ha facilitado cuantificar las discrepancias con otros climas representativos, como el normativo MET y el ampliamente utilizado IWECC.
- El análisis de las variables climáticas se destaca:
 - El clima actual TMY se caracteriza por temperaturas medias anuales de 16,7°C. Las estaciones reflejan marcadas diferencias: inviernos fríos (mínimas de -2,8°C) y veranos cálidos (máximas de 39,7°C). La humedad relativa anual es del 48%, alcanzando máximos en otoño (59%) y mínimos en verano (32%). La velocidad del viento tiene una media de 1,6 m/s, destacando la primavera con los mayores valores (>2,2 m/s). En términos de radiación solar, el promedio anual es de 397 W/m², con picos en verano (510 W/m²) y mínimos en invierno (297 W/m²).
 - Los climas MET e IWECC muestran marcadas diferencias con el TMY y por lo tanto podrían estar desconsiderando las tendencias climáticas actuales. Estos climas son más fríos y húmedos que el TMY, con diferencias anuales de temperatura de -3,1°C y -2,3°C, especialmente en las estaciones intermedias como primavera y otoño, mientras que la humedad relativa presenta una media anual de 58% y 62%. MET registra casi el doble de velocidad media anual (2,9 m/s), mientras que IWECC tiene 2,4 m/s de promedio que combina con muchos momentos de calma, especialmente en verano. Finalmente, la radiación global es ligeramente menor con diferencias de -68 W/m² y -80 W/m² anuales.
 - Las proyecciones climáticas muestran un calentamiento significativo a lo largo del tiempo, con aumentos de temperatura en 2050 de +1,5°C y +3,1°C respecto al TMY para SSP1 y SSP5 y que llegan hasta los +2,3°C y +4,4°C en 2080. Destaca la situación en la época estival de verano, en el que las medias anuales llegarán a 29,1°C (SSP1) y 32,4°C (SSP5) en 2080. La humedad relativa se mantiene prácticamente igual en 2050 y se reduce mínimamente

en 2080. La velocidad del viento es similar en todos los escenarios y años, con ligeras disminuciones en otoño bajo SSP5, mientras que la radiación anual sube ligeramente.

- El análisis de estos escenarios mediante índices climáticos, urbanos y edificatorios ha permitido, en un primer análisis, cuantificar su impacto desde diferentes perspectivas.
 - Los índices climáticos muestran un valor medio de Rango de temperatura extrema (ETR) de 19°C, proveyéndose aumentos en el futuro, que refleja una tendencia a temperaturas más extremas. El número de días de verano (SD) es de 133 para el TMY, ligeramente superior a MET (100) e IWECC (111). En los escenarios SSP, los días de verano aumentan en promedio 21 días para 2050 y 41 días para 2080, destacando su extensión en primavera y otoño en las proyecciones futuras. Las noches tropicales (TR) son 44 en el TMY, y se espera que estas cifras se dupliquen para 2050 y alcancen valores próximos a 100 en 2080, extendiéndose también a primavera y otoño. Los días helados (FD) son escasos en el TMY (3 días) y prácticamente inexistentes en los SSPs.
 - El índice de Malestar por Calor (DI) muestra para TMY un 86% de horas anuales en confort, mientras que el malestar por calor (ligero y medio-bajo) representa el 14%. Los climas MET e IWECC presentan un 85% de confort, ligeramente inferior. En los escenarios futuros SSP, el confort disminuye al 72% en 2050 y al 67% en 2080. Estacionalmente, en verano, el confort asociado al TMY cae al 43%, con malestar térmico bajo y medio-bajo y en SSP5 para 2080, las horas de confort desaparecen casi por completo, donde el malestar extremo afecta al 17% de la población. Además, aumenta el malestar en primavera y otoño.
 - En el escenario TMY, los grados días anual para calefacción (HDD) son considerablemente mayor que para refrigeración (CDD), con una proporción de 64-36. Los climas MET e IWECC muestran una proporción de 72-28, con valores de calefacción similares pero menores en refrigeración. En los escenarios futuros, aunque los valores de HDD disminuyen ligeramente, los de CDD aumentan considerablemente, especialmente en 2080, donde la proporción alcanza 38-62 en SSP5. Estacionalmente, en primavera, las proyecciones futuras muestran un aumento significativo en los valores de refrigeración.

Este capítulo pone de manifiesto que, para la correcta caracterización energética y térmica urbana, es crucial integrar en las metodologías el clima actual en el entorno urbano y sus proyecciones futuras.

5. Zonas Urbanas Homogéneas. Entornos representativos.

Las condiciones térmicas de los edificios se ven influenciadas por las características de su contexto urbano local debido a las interacciones de los flujos de calor del entorno local derivadas de la arquitectura, morfología y las características de los materiales. Además, estas particularidades modifican a nivel micro el clima predominante de la ciudad. Así pues, tener en cuenta estas peculiaridades resulta clave a la hora de definir planes estratégicos de regeneración urbana.

Para mejorar el proceso de evaluación térmica de los edificios, el objetivo principal de este capítulo consiste en definir un procedimiento de clasificación sistemática de áreas residenciales con características similares para identificar, caracterizar y clasificar objetivamente Zonas Urbanas Homogéneas representativas (*Homogeneous Urban Zones*, HUZs) [295]. Para ello, de forma específica se plantean los siguientes objetivos parciales, usando como caso de estudio la ciudad de Madrid:

- i) Análisis de las iniciativas e indicadores para la clasificación del contexto urbano (Sección 5.1.).
- ii) Definición de la metodología para la identificación de las HUZs de la ciudad de Madrid a través de la definición de clústeres urbanos basados en el uso de diversos indicadores (Sección 5.2.).
- iii) Caracterización de las diferentes tipologías HUZ mediante análisis estadístico, localización e interpretación acorde a sus características urbanas (Sección 5.3.).

5.1. Iniciativas e indicadores para clasificar el contexto urbano.

La correlación entre el análisis energético urbano y las características urbanas ha sido ampliamente investigada [296]. Para ello se recurre a clasificaciones, que tratan de buscar patrones de comportamiento similar en base a indicadores relevantes en la caracterización térmica.

Los principales sistemas de clasificación a nivel urbano identifican la huella urbana y su clase de cobertura del suelo, a través de una aproximación *top-down*. Estas clasificaciones, que alimentan la mayoría de las evaluaciones de simulación UBEM, se obtienen generalmente de sistemas de información de teledetección. A nivel europeo, los mapas de *Corine Land Cover* (CLC) clasifican un total de 44 paisajes homogéneos mediante interpretación visual de imágenes satelitales de alta resolución, que se agrupan en cinco categorías principales, incluida una categoría de "superficies artificiales" que incluye el tejido urbano [297]. La iniciativa *Urban Atlas* ofrece una resolución más detallada para las áreas urbanas funcionales de Europa, diferenciando cinco densidades de tejido urbano [298]. La aproximación de zonas climáticas locales (*Local Climate Zones*, LCZs), que clasifica los entornos urbanos según su perfil de ICU, distingue hasta 10 clases urbanas según su estructura y cobertura de superficie [299]. También se han desarrollado otras bases de datos globales de cobertura del suelo, como AVHRR, MODIS GLCF y ESA GlobCover, pero sus resoluciones (de 300 a 10 km) son demasiado bajas para los análisis a nivel de ciudad [300]. Alternativamente, otras fuentes que aportan información geolocalizada, pese a no estar destinadas al análisis de cobertura de suelo en sí mismas, pueden ofrecer información muy relevante. Por ejemplo, los datos catastrales aportan características del tipo

de suelo y usos para los que está destinada la parcela o la altura y dimensiones de la edificación, entre otros. Las delegaciones provinciales y municipales también pueden proporcionar información muy detallada como zonas verdes, láminas de agua, arbolado, áreas ajardinadas, viario rodado y zonas pavimentadas o edificadas. Finalmente, los planes urbanísticos, especifican formas de construir según las características históricas o edificatorias para conjuntos de construcción similar. A través de esta información, también se puede obtener patrones de clasificación urbana esenciales.

Dentro de estos patrones urbanos la literatura destaca como influyentes en el rendimiento energético de los edificios diferentes indicadores que se pueden agrupar en tres categorías: características arquitectónicas, morfológicas y de cobertura de suelo.

Desde la perspectiva arquitectónica, la mayoría de los estudios deducen el comportamiento térmico urbano a partir del año de construcción, relacionándolas con las principales tendencias evolutivas en el desarrollo urbanístico. Este es el caso de clasificaciones como TABULA-ERISCOPE o las ofrecidas por el IDAE, cuyo uso está muy extendido [301], [302]. El número y tamaño de las viviendas también es un predictor significativo del consumo energético, al igual que la relación de aspecto del edificio (altura y tamaño de planta), el perímetro o el coeficiente de forma, relacionados con la superficie de la envolvente exterior [303].

Desde el punto de vista morfológico, la densidad de edificación, la superficie construida, la huella de las edificaciones, la profundidad de los edificios y el índice de área frontal, son factores determinantes. Por ejemplo, las zonas urbanas de alta densidad y gran altura están asociados con un consumo de energía menor pero concentrado geográficamente, mientras que la expansión urbana y las áreas residenciales periféricas están vinculadas a un aumento de las emisiones de GEI per cápita debido al uso intensivo del automóvil y a las mayores dimensiones de las viviendas [304]. Por otro lado, el factor de vista del cielo (Sky View Factor) influye en la disponibilidad de luz natural, de la radiación solar, la ganancia de calor, la percepción de amplitud o el movimiento del aire exterior, todos ellos estrechamente relacionados con el efecto cañón urbano y el comportamiento térmico. Los valores intermedios del cañón urbano (relación entre altura edificatoria y ancho de calle, H/W) facilitan el acceso solar, mientras que los valores más elevados se asocian con altas temperaturas debido al efecto de ICU provocado por las múltiples reflexiones y la absorción de la radiación [305].

El acceso solar de las viviendas depende de la morfología urbana, pero también de la distribución espacial y cobertura del suelo. Esto se refleja en el caso de los patios interiores, que afectan a las condiciones térmicas de los muros circundantes y de las estancias interiores. Las zonas destinadas a la vegetación, los pavimentos impermeables o las vías permeables, son decisivas para las evaluaciones de sostenibilidad y están en estrecha relación con el microclima urbano [306]. De hecho, la clasificación LCZ destaca propiedades físicas como la rugosidad, el albedo, la admitancia térmica y la impermeabilidad como factores determinantes en el desarrollo del efecto UHI [299]. Los materiales de alto albedo y emisividad, sumados a un elevado factor de visibilidad del cielo, reducen la temperatura radiante media durante la noche [160]. Las superficies impermeables, como muros y carreteras, son fuentes de calor, mientras que los árboles y el agua, así como las praderas, actúan como

sumideros de calor, durante todo el año y notablemente en las estaciones cálidas y calurosas [307]. Así pues, el aumento de la vegetación en las zonas urbanas permite mejorar eficazmente el microclima urbano, especialmente en verano [308]. Además, el viento local y la radiación de onda corta serán más relevantes en las estructuras abiertas con grandes zonas peatonales o de paso, mientras que en las construcciones compactas influyen más las interacciones de los materiales circundantes (radiación de onda larga). En este sentido la topografía también presenta un papel relevante, puesto que en las zonas más elevadas la radiación solar directa y el viento serán más predominantes, al reducirse los obstáculos urbanos [309]. Adicionalmente, los cauces fluviales reducen notablemente las temperaturas [310]. Además, en aquellos casos en los que, la trama urbana coincide con la dirección predominante de los flujos de viento, favorecen la ventilación, reduciendo la sensación térmica [311]. Por último, no sólo la distribución del espacio, sino el acceso público debería ser un factor crucial en la distribución espacial, especialmente para el caso de las zonas verdes que actúan como refugios térmicos en la época estival, y siendo muy significativas para el análisis medioambiental [312].

5.2. Identificación de HUZs representativas. Aproximación urbana

Con tal fin, el procedimiento de identificación de Zonas Urbanas Homogéneas (HUZ) residenciales representativas, se ha propuesto cuatro fases, que consisten en la recopilación de datos, caracterización de clústeres urbanos y su validación, así como posteriores métodos de ponderación y proximidad para mejorar la clasificación HUZ [295]. Para ello se ha utilizado la aproximación de cobertura de suelo, tomando como unidad de referencia urbana una superficie de 200 m x 200 m (40.000 m²), a la que se ha denominado píxel.

5.2.1. Recopilación de datos. Fase 1

La Fase 1 consistió en la recopilación de los datos disponibles para el estudio del caso, incluyendo clasificaciones urbanas y edificatorias, e indicadores a diversas escalas y niveles de desagregación, como se muestra en la Figura 21. Esta fase se divide en la definición de estructuras urbanas e indicadores representativos.

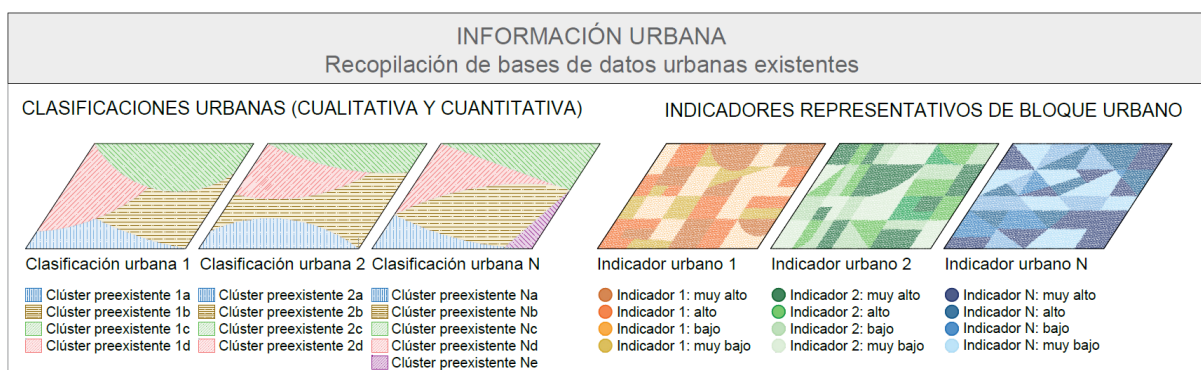


Figura 21. Metodología HUZ. Fase 1: Recopilación de datos de diversas fuentes de clasificaciones urbanas e indicadores.

Estructuras de clasificaciones urbanas y fuentes de datos

Se realizó una revisión de las fuentes de datos más adecuadas para la ciudad de Madrid, entre las que se incluían las que contenían clasificaciones urbanas previas e información relacionada con diferentes indicadores urbanos. Para ello, se utilizaron datos urbanos a nivel nacional, regional y local para el caso de estudio de Madrid. Estas fuentes de datos se describen a continuación y en la Figura 22:

- i) Dirección General del Catastro de España (DGCE): una base de datos nacional que clasifica y cartografía la cobertura del suelo español por propiedades catastrales. Los datos cuantitativos están vinculados a las edificaciones, lo que permite la interpretación de varios indicadores urbanos. Establece cuatro tipologías de edificaciones residenciales, incluyendo bloques colectivos (cerrados y abiertos) y viviendas unifamiliares (aisladas y adosadas) [313]
- ii) Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (IECM): una plataforma regional en línea que determina ocho clases urbanas residenciales y varios datos cuantitativos sobre la cobertura del suelo, como zonas verdes y cuerpos de agua [314]
- iii) Plan General de Ordenación Urbana de Madrid (PGOUM): el plan urbano local que utiliza cualitativamente ocho zonas normativas (ZN) para caracterizar las áreas urbanas residenciales construidas antes de 1997. Las áreas urbanas residenciales no consolidadas (construidas después de 1997) se clasifican como áreas urbanas indefinidas (No ZN) [315]
- iv) Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid (MODP): una fuente de datos locales detallada que proporciona una gran cantidad de información sobre el uso de edificios, la distribución de carreteras y las áreas peatonales [316]. MODP incluye tanto fuentes de datos cuantitativos como cualitativos.

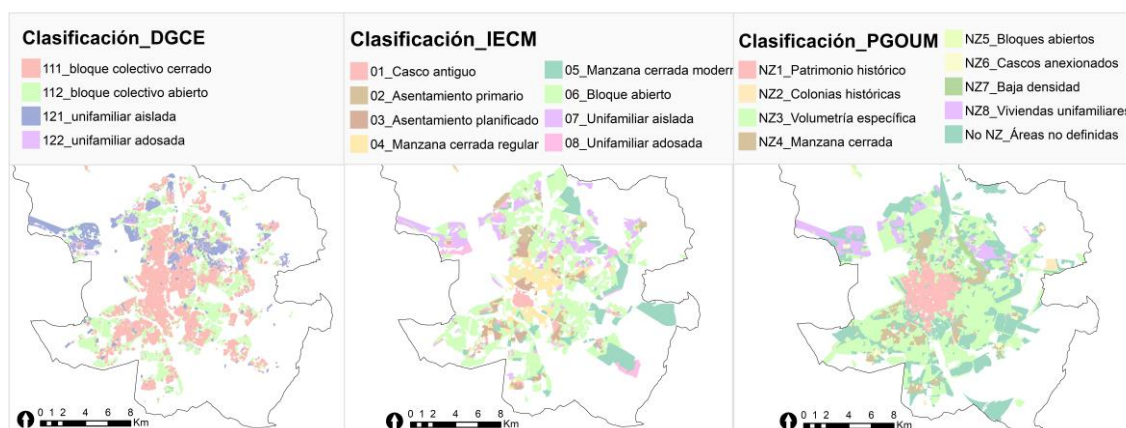


Figura 22. Metodología HUZ. Fase 1: clasificaciones urbanas nacionales, regionales y locales existentes para Madrid.

Indicadores urbanos representativos

El análisis de la Sección 5.1., revisa como principales patrones urbanos en el comportamiento energético de los bloques urbanos las características del edificio, la morfología y densidad urbana, así como la distribución del material urbano a nivel público, semipúblico y privado. A partir de este

análisis, la Tabla 3 presenta los indicadores de bloques urbanos identificados como relevantes, así como su cálculo diversas herramientas GIS a partir de las principales fuentes de datos para Madrid. Para facilitar la escalabilidad de la metodología únicamente se han considerado, aquellos indicadores intrínsecos a la forma del urbanismo, por lo que la topografía o la proximidad a grandes masas de aguas no se han tenido en cuenta.

NOMBRE	DEFINICIÓN	FUENTE DE DATOS	
CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS			
AÑO DE CONSTRUCCIÓN ConsYear [año]	Año de construcción o la última renovación completa del edificio. ^a	DGCE ⁱ	● Año de construcción actualizado
ALTURA DE LA EDIFICACIÓN BuildHeight [m]	Altura sobre el suelo, considerando el número de pisos por 3,5 m. ^b	DGCE ⁱ	● Número de pisos
DENSIDAD DE VIVIENDAS DweDens [Nº Viviendas/km²]	Número de viviendas por área (km²). ^a	DGCE ⁱ	● Número de viviendas
MORFOLOGÍA URBANA			
DENSIDAD DE EDIFICIOS BuildDens [Nº Edificios/km²]	Número de edificios residenciales por área (km²). ^b	DGCE ⁱ	● Número de edificios
ÁREA CONSTRUIDA BuiltUp [%]	Área residencial construida sobre el suelo. ^c	DGCE ⁱ	● Área total construida por edificio
HUELLA DE LA EDIFICACIÓN BuildFoot [%]	Huella espacial del área residencial construida. ^c	DGCE ⁱ	● Huella espacial por edificio
CAÑÓN URBANO UrbCanyon [adimensional]	Relación entre la altura de los edificios y el ancho de la calle formada por dichos edificios. ^b	DGCE ⁱ , MODP ⁱⁱⁱ	● Altura de los edificios ● Eje longitudinal de la calle ● Superficie de la carretera (asfalto, acera, carril bici)
CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE			
ÁREA CAMINABLE WalkArea [%]	Áreas caminables públicas y privadas. ^c	MODP ⁱⁱⁱ , IECM ⁱⁱ	● Zonas verdes, no construidas, pavimentadas, carriles bici, patios ajardinados y jardines privados
ÁREA VERDE PÚBLICA GreenArea [%]	Áreas públicas que incluyen bosques urbanos, parques, jardines comunitarios, arbustos ornamentales y lagos. ^c	MODP ⁱⁱⁱ , IECM ⁱⁱ	● Zonas verdes (parques y calles ajardinadas) ● Grandes parques ● Cuerpos de agua
PATIO INTERIOR PRIVADO InnerCourt [%]	Patios privados en áreas residenciales construidas que proporcionan acceso a la luz diurna a las habitaciones interiores. ^c	DGCE ⁱ , MODP ⁱⁱⁱ	● Áreas de patios ajardinados ● Áreas de patios no ajardinados.
a) promedio ponderado de la superficie por píxel; b) promedio por píxel; c) porcentaje por píxel. i) Dirección General del Catastro de España (DGCE); ii) Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (IECM) y iii) Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid (MODP).			

Tabla 3. Metodología HUZ. Fase 1: indicadores de manzanas urbanas representativas.

5.2.2. Caracterización de los clústers urbanos. Fase 2

La Fase 2 consistió en identificar agrupaciones urbanas dentro de las clasificaciones urbanas existentes. Estos conglomerados son posibles HUZs, los cuales serán validados en la Fase 3. La Figura 23 ilustra el proceso de identificación de agrupaciones urbanas preexistentes y la definición de agrupaciones urbanas mediante indicadores de bloques urbanos.

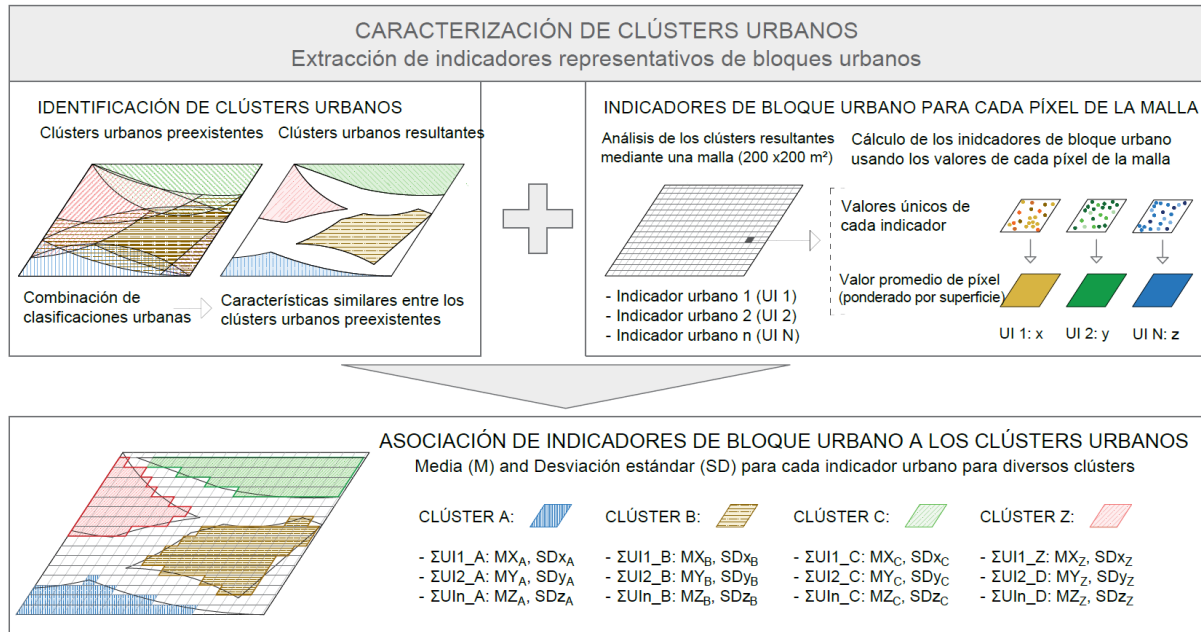


Figura 23. Metodología HUZ. Fase 2: proceso de identificación y caracterización de conglomerados urbanos.

El software GIS se aplicó para comparar y analizar los datos urbanos dentro de una malla creada para la ciudad de Madrid, utilizando el motor de cálculo de ArcGIS Desktop 10.8 proporcionado por las herramientas de Esri [317]. La selección del tamaño del píxel se escogió en base al análisis de diversos estudios energéticos en los que se analizan diferentes factores urbanos a través de una malla. Algunos ejemplos se muestran en trabajos como el realizado en Sevilla para la definición de los indicadores de sostenibilidad ambiental, el análisis de sensibilidad desarrollado para la ciudad de Basel para el tratamiento de la ICU o el análisis de correlación entre microclima y geometría urbana aplicado a la ciudad de Londres [318], [319], [320]. De esta forma, el tamaño de malla seleccionado fue 200 m x 200 m, por proporcionar el mejor balance para el menor tamaño píxel y mayor correlación de indicadores urbanos [320].

Una vez seleccionado el tamaño de malla, a cada píxel se asoció a un conglomerado urbano, y se calcularon los valores medios de los indicadores de bloques urbanos para cada píxel (UI 1: x, UI 2: y, ..., UI N: z). Los conglomerados urbanos individuales se caracterizaron luego a través de la media (Mx_A , ..., MZ_z) y la desviación estándar (SDx_A , ..., SDZ_z) de sus píxeles.

Este proceso se centró en las áreas residenciales representadas por conglomerados preexistentes, excluyendo así las zonas no residenciales, los edificios no residenciales y cualquier zona residencial que careciera de representación en los clústers. Se consideró que los píxeles eran representativos de un

clúster urbano siempre que al menos el 85% de su área total (o el área construida residencial del píxel en clasificaciones urbanas de superficie construida) perteneciera a una categoría específica de clúster. Este valor se escogió por representar un balance óptimo de representatividad urbana. Debido a la reducida área de cobertura que en ocasiones suponen las tipologías unifamiliares respecto a los edificios de bloques colectivos, la superficie mínima de área para considerar un píxel representativo en estas áreas de viviendas individuales se redujo a los 10000 m². Siguiendo estos criterios, se identificaron un total de 4023 píxeles residenciales, que representan el 28% del área de Madrid.

La Tabla 4 presenta los clústers preexistentes identificados para Madrid. Estos se derivaron de la combinación de tres clasificaciones urbanas diferentes, lo que resultó en nueve clústers urbanos distintos como se ilustra en la Figura 5.

CLASIFICACIÓN DE BASES DE DATOS URBANAS, CLÚSTERES URBANOS PREEXISTENTES			CLÚSTERES URBANOS
DGCE. Nivel Nacional	IECM Nivel Regional	PGOUM Nivel Local	
Bloque Colectivo cerrado (Tipología constructiva del Catastro 112)	Casco Antiguo (Clase 01)	Patrimonio Histórico (Norma Zonal 1, NZ1)	B_HC: Bloques de Centro Histórico <i>Historical Center Blocks</i>
	Manzana Cerrada Regular (Clase 04)		B_HE: Bloques de Ensanche Histórico <i>Historical Extension Blocks</i>
	Asentamientos Primarios (Clase 02)	Manzana Cerrada (Norma Zonal 4, NZ4)	B_NA: Bloques Cerrados No Planificados <i>Non-Planned Attached Blocks</i>
		Cascos Anexionados (Norma Zonal 6, NZ6)	
	Asentamientos Planificados (Clase 03)	Manzana Cerrada (Norma Zonal 4, NZ4)	B_PA: Bloques Cerrados Planificados <i>Planned Attached Blocks</i>
	Manzana Cerrada Moderna (Clase 05)	No Consolidado, (Suelo urbanizable, NZU)	B_SC: Bloques de Manzana Semi-abierta <i>Semi-open Collective Blocks</i>
Bloque Colectivo Abierto (Tipología constructiva del Catastro 111)	Bloques Abiertos (Clase 06)	Volumetría Específica (Norma Zonal 3, NZ3)	B_OC: Bloques Colectivos Abiertos <i>Open collective Blocks</i>
		Bloques Abiertos (Norma Zonal 5, NZ5)	
Unifamiliar Aislada o Pareada (Tipología constructiva del Catastro 121)	Unifamiliar Aislada o Pareada (Clase 07)	Colonias Históricas (Norma Zonal 2, NZ2)	H_DV: Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage <i>Vintage Detached/Semi-detached</i>
		Volumetría Específica (Norma Zonal 3, NZ3)	
		Viviendas Unifamiliares (Norma Zonal 8, NZ8)	H_DS: Unifamiliares Aisladas o Pareadas <i>Detached/Semi-detached</i>
		Baja Densidad (Norma Zonal 7, NZ7)	
		No Consolidado (Suelo urbano y urbanizable, NZAPI, NZU)	
Unifamiliar Adosada o en Hilera		Colonias Históricas (Norma Zonal 2, NZ2)	H_TV: Unifamiliares Adosadas o en Hilera Vintage <i>Vintage Detached/Semi-detached Houses</i>

(Tipología constructiva del Catastro 122)	Unifamiliar Adosada o en Hilera (Clase 08)	Volumetría Específica (Norma Zonal 3, NZ3)	H_TR: Unifamiliares Adosadas o en Hilera <i>Terraced/Row houses</i>
		Viviendas Unifamiliares (Norma Zonal 8, NZ8)	
		Baja Densidad (Norma Zonal 7, NZ7)	
		No Consolidado (Suelo urbano y urbanizable, NZAPI, NZU)	

Tabla 4. Metodología HUZ. Fase 2: resultados de la combinación de tres bases de datos urbanas para conglomerados urbanos preexistentes en Madrid.

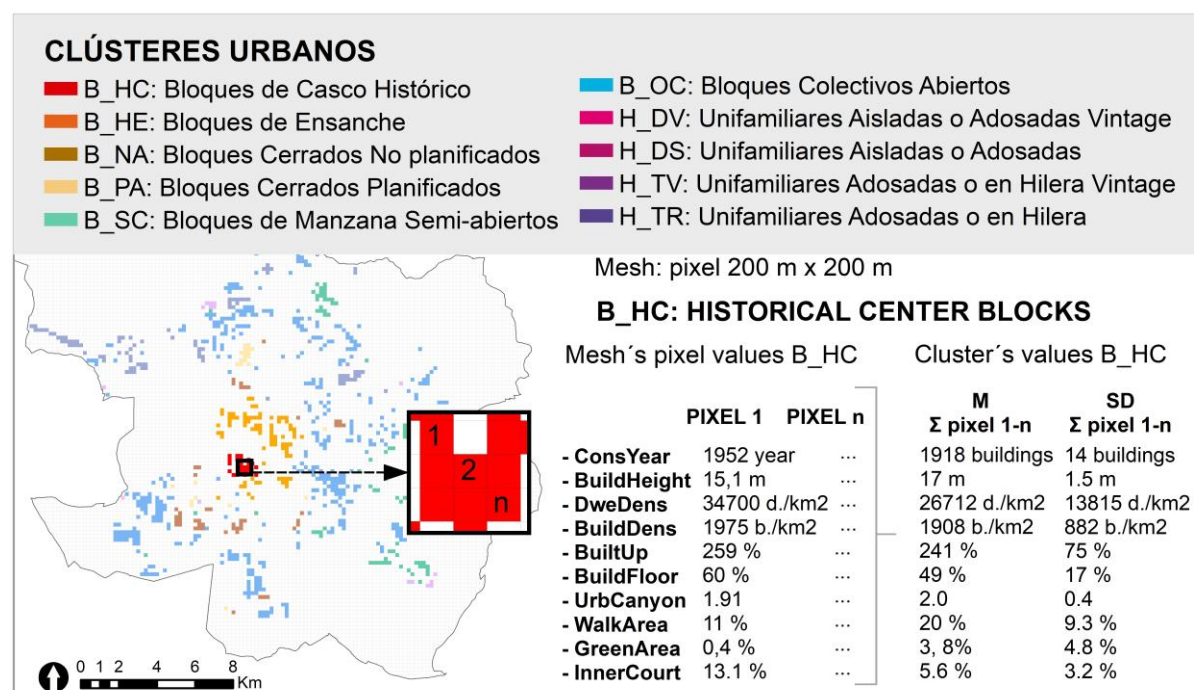


Figura 24. Metodología HUZ. Fase 2: clasificación espacial de los clústeres urbanos de Madrid.

5.2.3. Validación estadística. Fase 3

Esta fase se basa en los requisitos estadísticos definidos para para que un clúster urbano sea considerado una Zona Urbana Homogénea (HUZ), la cual se basa en el cumplimiento de tres condiciones, como muestra la Figura 25. Su explicación detallada se detalla a continuación:

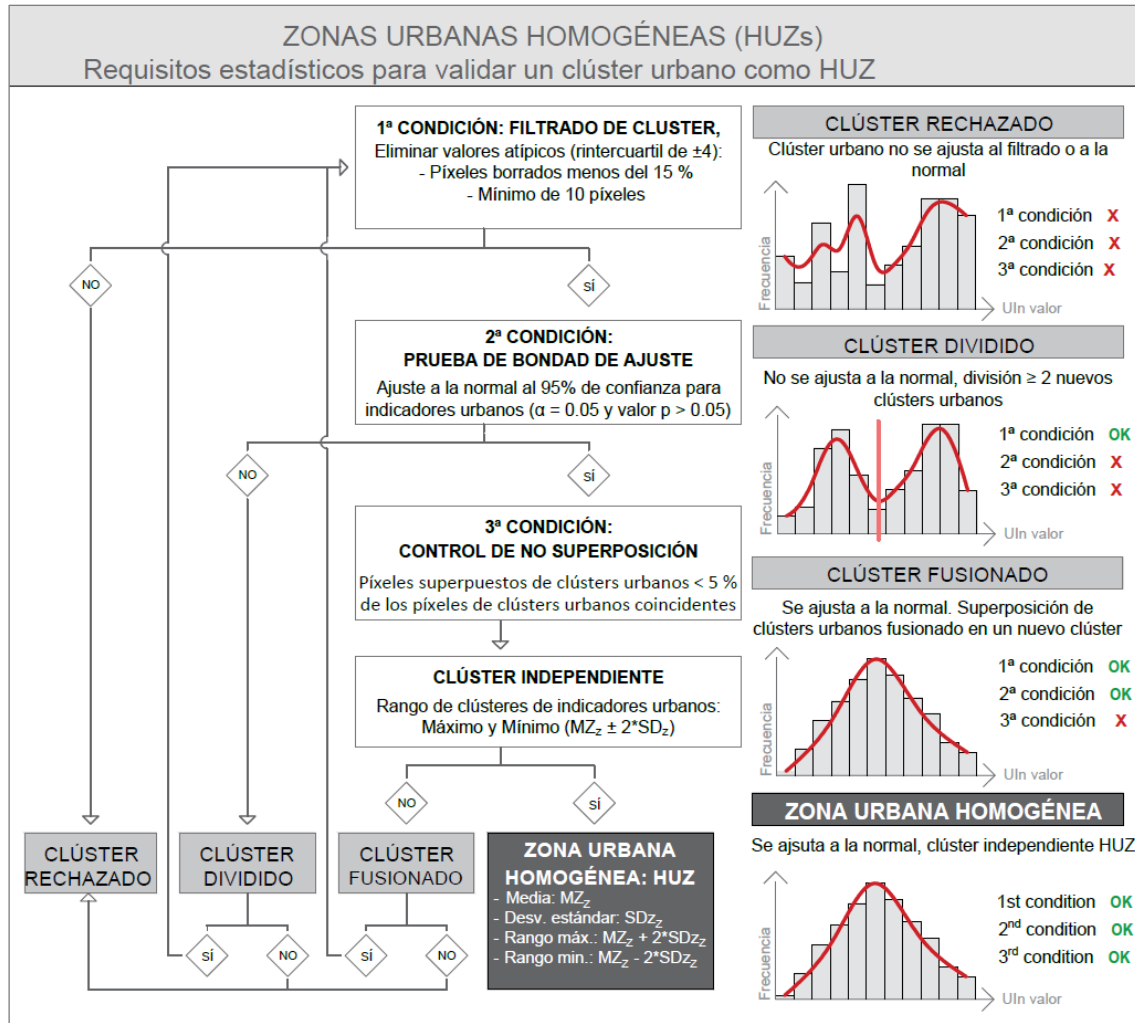


Figura 25. Metodología HUZ. Fase 3: verificación estadística de las Zonas Urbanas Homogéneas.

- i) Primera condición, filtro de clúster: la primera etapa consiste en eliminar los píxeles que se sospecha que sean valores atípicos (definidos aquí como ± 4 veces el rango intercuartílico del valor medio del clúster). Estos píxeles atípicos se limitan de tal forma que no deben representar más del 15 % de todos los píxeles que conforman el clúster, y los píxeles restantes deben ser al menos diez.
- ii) Segunda condición, prueba de bondad de ajuste: los datos filtrados de los píxeles se someten a la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) [321], la cual evalúa cómo de bien se ajustaba cada indicador urbano dentro de un clúster a una función de distribución estadística. Se selecciona la estadística K-S puesto que los indicadores urbanos analizados, mostrados en la Tabla 3, pertenecen a una distribución no paramétrica, cuantitativa y continua. Para ello se utiliza un intervalo de confianza del 95 % (es decir, $\alpha = 0,05$ y valor $p > 0,05$). Los clústers que cumplen con la segunda condición se definen por su categoría, así como los valores medios de sus indicadores ($MEANzZ$), desviación estándar ($SDzZ$) y rango ($MEANzZ \pm 2SDzZ$). Además, los indicadores urbanos que representaban un porcentaje de superficie (p. ej., zonas verdes o patios interiores) se descartan cuando su media era inferior al 1 % debido a su baja representatividad (es decir, menos de 400 m² para un área de píxel de 200 m x 200 m).

- iii) Tercera condición, control de no superposición: finalmente, se evalúa la superposición utilizando los rangos de indicadores de cada categoría de clúster. Los píxeles superpuestos se limitan al 5% del total de píxeles compuestos por clústeres urbanos coincidentes, garantizando que cada clúster consiste en una población independiente y representativa.

Cuando alguna de estas tres condiciones no se cumple, se realiza una de las siguientes operaciones:

- Fusión de clústeres: Se aplica cuando se cumplen todas las condiciones excepto la tercera, soplandose el clúster de estudio con uno o varios clústeres vecinos. En este caso, los clústeres solapados se fusionan y se vuelve a comprobar las tres condiciones de HUZ. De lo contrario, el clúster se rechaza.
- División de clúster: Se aplica cuando se cumple la primera condición, pero no la segunda ni la tercera. Dado que la prueba K-S no es satisfactoria, se intenta dividir el clúster en dos o más clústeres urbanos. En caso de ser necesario, además se propone introducir nuevos indicadores urbanos para obtener nuevas poblaciones independientes y reiniciar el proceso de identificación de HUZ. En aquellos casos en los que la división no es posible, el clúster se rechaza.
- Rechazo de clúster: Se rechaza el clúster cuando no se cumple ninguna de las tres condiciones. También se considera este rechazo desde un primer momento en los casos en los que el clúster tiene menos de 10 píxeles o los datos filtrados representan menos del 15 %.

El proceso de análisis estadístico de los clústeres identificados en Madrid se muestra en la Figura 26. Se clasificaron directamente como HUZs: Bloques del Casco Histórico (B_HC), Bloques de Ensanche Histórico (B_HE), Bloques Colectivos Semiabiertos (B_SC), Unifamiliares Aisladas o Pareadas (H_DS) y Unifamiliares Adosadas o en Hilera (H_TR). La clase HUZ denominada Bloques de Manzana Cerrada (B_CA) se creó fusionando los Bloques Cerrados No Planeados (B_NA) y los Bloques Cerrados Planeados (B_PA). Cuatro indicadores urbanos dentro del clúster Bloques Colectivos Abiertos (B_OC) (BuildDens, BuiltUp, BuildHeight y UrbanCanyon) no siguieron una distribución normal. Por ello se usó dos indicadores (BuildHeight e InnerCourt) para dividir el grupo urbano en cuatro poblaciones independientes, generando las nuevas tipologías HUZs: Bloques Bajos de Doble Hilera (B_DL), Bloques Altos de Doble Hilera (B_DH), Bloques Bajos de Hilera Simple (B_SL) y Bloques Altos de Hilera simple o Torres (B_SH). De la misma forma, tres indicadores (ConsYear, BuildDens y BuiltUp) se usaron para crear las HUZs correspondientes a Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage (H_DV) y Unifamiliares Adosadas o en Hilera Vintage (H_TR).

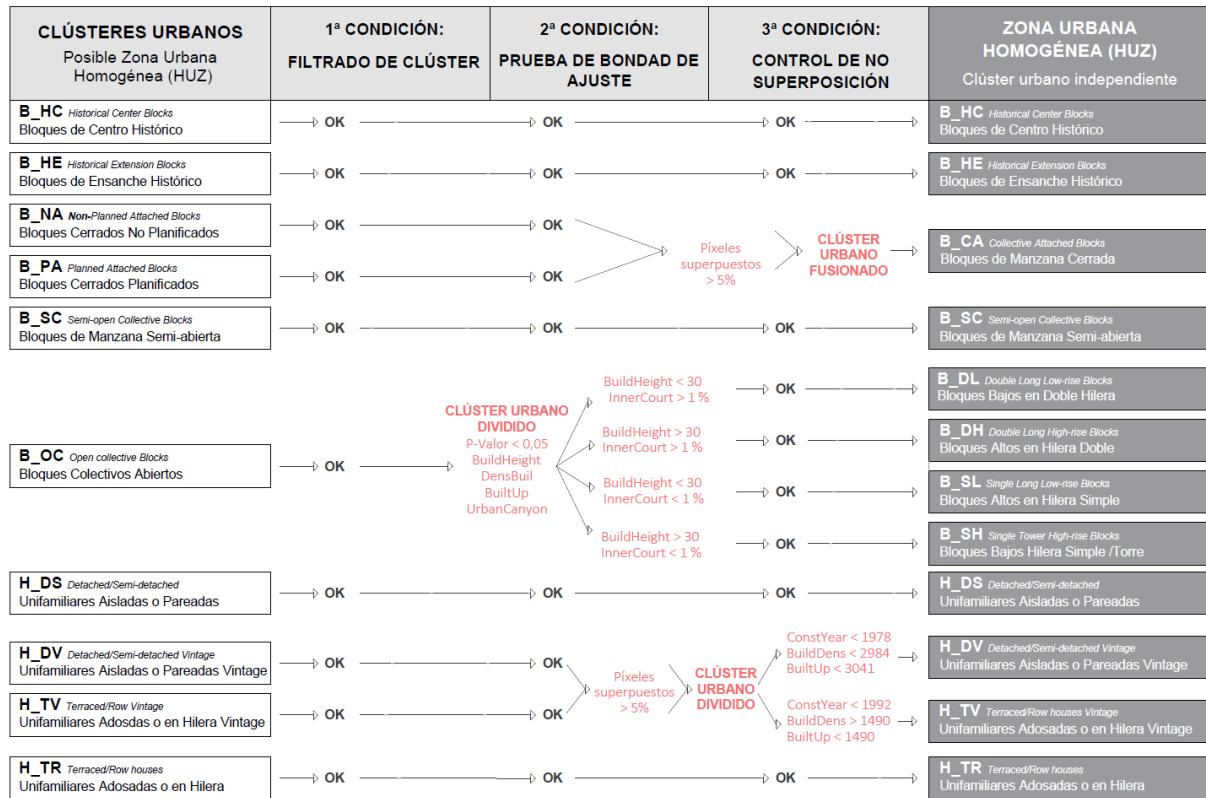


Figura 26. Metodología HUZ. Fase 3: Análisis estadístico para determinar si los clústeres urbanos identificados en Madrid pueden considerarse HUZ.

5.2.4. Ponderación y proximidad de indicadores urbanos.

Finalmente, una vez identificados las HUZs representativas y singulares para la ciudad, se plantea extender el rango de cobertura de la clasificación, con el fin de evitar en la medida de lo posible zonas sin catalogar. Estas nuevas HUZs ampliadas, implican que, pese a que un área de estudio no sea una HUZ original (HUZ-PixOrig), es decir que el 100% de sus indicadores pertenezcan a una categoría HUZ, sí lo pueda hacer en un porcentaje, dependiendo de la proximidad de dichos indicadores a una HUZ.

La Figura 27 muestra el proceso de ponderación de los límites de los indicadores urbanos, de tal forma que, para cada píxel se calcula en qué porcentaje éste se asemeja a una clase HUZ específica. El cálculo se hace a partir de los valores de media (MEANzZ), y desviación estándar (SDzZ) calculados previamente. Para ello, a cada píxel se le asignan diferentes valores, uno por cada indicador y HUZ identificados, siendo en este caso 120 valores (10 indicadores X 12 clases HUZs). Este valor será 0,10 si está dentro de una clase HUZ, es decir, el valor está dentro de los límites de $MEANzZ \pm 2SDzZ$, cubriendo al menos un 95,4 % de la población. Para valores superiores a $MEANzZ \pm 2SDzZ$, se irá disminuyendo este número a razón de 0,01 puntos hasta llegar al valor 0 para $MEANzZ \pm 3SDzZ$, en el que se cubre el 99,7% de los casos.

Una vez finalizado este proceso, la suma de los valores asociados a cada HUZ indicará en qué porcentaje cada píxel pertenece a una HUZ determinada, correspondiendo el valor 1 y 0 al 100% y 0% respectivamente. Por último, cada píxel se clasificará con aquella HUZ de mayor porcentaje.

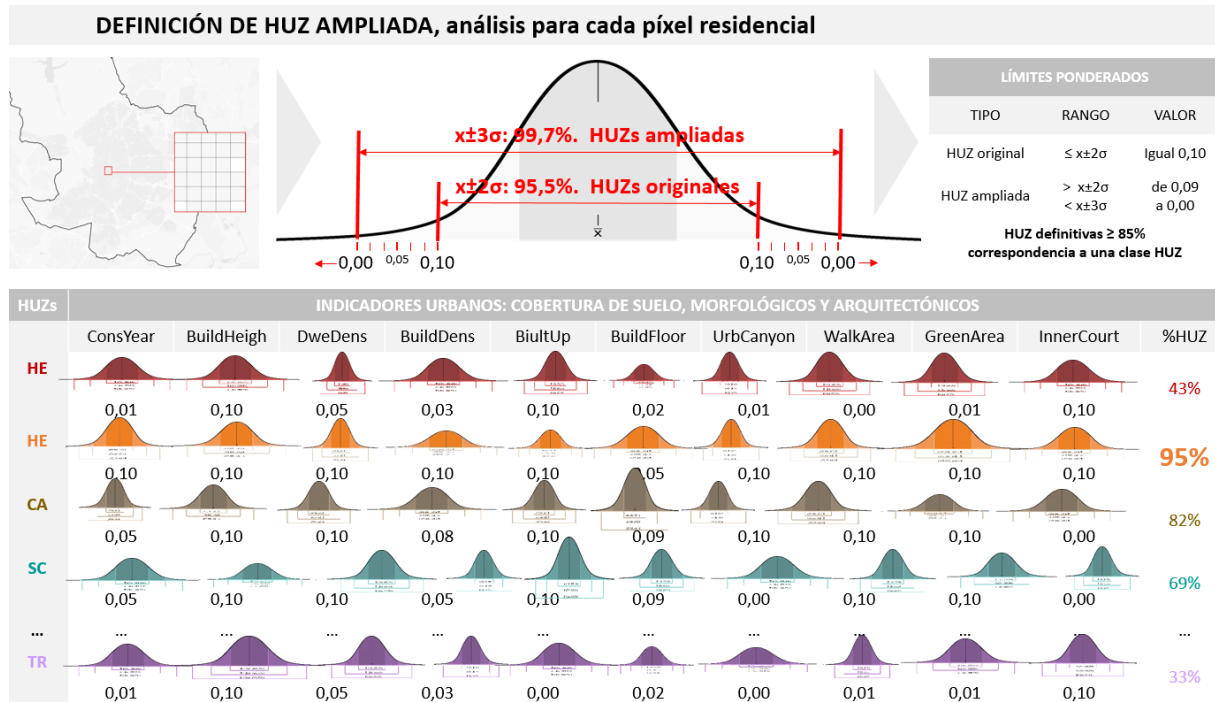


Figura 27. Metodología HUZ. Fase 4: Ponderación de límites de los indicadores urbanos. Definición de HUZs ampliadas.

Se han considerado como HUZs extendidas y definitivas, (HUZ-PixEx), aquellos píxeles que pertenecen al menos en un 85% a una clase HUZ, por considerarse un balance óptimo entre alta cobertura de clasificación y calidad en dicha categorización (HUZ-PixExInd). Por el contrario, a los píxeles con un valor HUZ inferior al 85%, se le ha asignado su HUZ original más cercana, siempre y cuando esta distancia sea inferior a 600 m (2 píxeles), considerando de esta forma la relevancia del entorno más próximo (HUZ-PixExLoc).

5.3. Caracterización del entorno representativo de las HUZs

En este apartado se presentan los resultados de la evaluación estadística para el procedimiento HUZ aplicado a la ciudad de Madrid, su clasificación y representación final, así como la interpretación de sus clases establecidas a través de sus indicadores de manzana urbana y ubicación.

5.3.1. Análisis estadístico de la metodología HUZ

La aplicación de la metodología en la ciudad de Madrid revela 12 clases HUZs. La Tabla 5 define el rango de los indicadores urbanos para cada clase HUZ e incluye una imagen real de un píxel representativo, manteniendo la misma escala y dimensiones para todos los casos. El píxel representativo fue asignado por ocupar el primer lugar entre todos los píxeles, lo que ocurre cuando los valores de desviación estándar del conjunto de indicadores urbanos están más cerca de la media.

ZONA URBANA HOMOGÉNEA	B_HC: Bloques de Centro Histórico		B_HE. Bloques de Ensanche Histórico		B_CA. Bloques de Manzana Cerrada		B_SC. Bloques de Manzana Semiabierta		B_DL. Bloques Bajos en Doble Hilera		B_DH. Bloques Altos en Doble Hilera	
Píxel representativo												
Indicador de bloque de manzana urbana	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
INDICADORES ARQUITECTÓNICOS												
ConsYear [año]	1890	1945	1931	1971	1955	1982	1993	2014	1953	1984	1959	1989
BuildHeight [m]	14	20	18	26	9	15	12	27	14	29	30	46
DweDens [nºviv/Km²]	0	54342	5724	43917	13242	29300	0	17306	6133	27344	520	43114
INDICADORES MORFOLÓGICOS												
BuildDens [nº edif/Km²]	144	3671	378	1656	1169	3734	0	181	0	1196	0	947
BuiltUp [%]	91 %	391 %	166	419	118	239	0	178	65	211	73	346
BuildFloor [%]	16 %	83 %	25	67	37	65	0	36	10	34	7	32
UrbCanyon [-]	1.1	2.9	0.9	1.8	0.8	1.5	0.5	1.2	0.4	1.8	0.9	1.9
INDICADORES DE COBERTURA DE SUELO												
WalkArea [%]	1	39	7	29	6	31	26	86	37	76	18	75
GreenArea [%]	0	13	0	4	0	4	0	48	3	40	0	48
InnerCourt [%]	0	12	0	15	3	14	0	18	1	4	1	5

ZONA URBANA HOMOGÉNEA	B_SL. Bloques Bajos en Hilera Simple		B_SH. Bloques Altos en Hilera Simple /Torres		H_DV. Unifamiliares Aisladas /Pareadas Vintage		H_DS. Unifamiliares Aisladas /Pareadas		H_TV. Unifamiliares Adosadas o en Hilera Vintage		H_TR. Unifamiliares Adosadas o en Hilera	
Píxel representativo												
Indicador de bloque de manzana urbana	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
INDICADORES ARQUITECTÓNICOS												
ConsYear [año]	1954	1988	1966	1990	1939	1978	1962	1998	1942	1992	1991	2016
BuildHeight [m]	13	30	30	56	2.83	10.89	4	7	4.66	9.14	6	9
DweDens [n°viv/Km²]	3097	22771	1138	23666	773	2984	0	1045	1490	10495	0	3796
INDICADORES MORFOLÓGICOS												
BuildDens [n° edif/Km²]	0	1605	0	622	833	3041	0	986	1490	10506	0	2580
BuiltUp [%]	37	186	11	271	21	73	7	46	28	93	0	68
BuildFloor [%]	5	31	1	23	15	32	4	24	17	45	0	28
UrbCanyon [-]	0.4	1.8	0.8	2.9	0.15	0.96	0.3	0.7	0.14	1.11	0.1	0.6
INDICADORES DE COBERTURA DE SUELO												
WalkArea [%]	41	78	41	79	48	66	63	85	23	72	43	88
GreenArea [%]	0	40	0	46	0	6	0	1	0	18	0	54
InnerCourt [%]	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0

Tabla 5. Zonas urbanas homogéneas de Madrid: imágenes representativas y sus valores de rango (máximo y mínimo). Valores < 0 se consideran 0

La Figura 28 muestra la ubicación y representatividad de 1.626 píxeles clasificados como HUZ originales (HUZ-PixelOrig), es decir 65 km², dentro de un total de 3.906 píxeles residenciales. Finalmente, la Figura 29 representa los rangos de los indicadores de bloques de manzanas urbanas de las HUZs y sus promedios. Además, para facilitar la interpretación, se incluye una escala que indica los valores de rango bajo, medio y alto en escala de grises, la cual se determinó considerando los valores máximos y mínimos de los rangos de cada indicador y dividiéndolos en partes iguales. Adicionalmente, se muestra el promedio de la media de los indicadores urbanos para todas las clases HUZs.

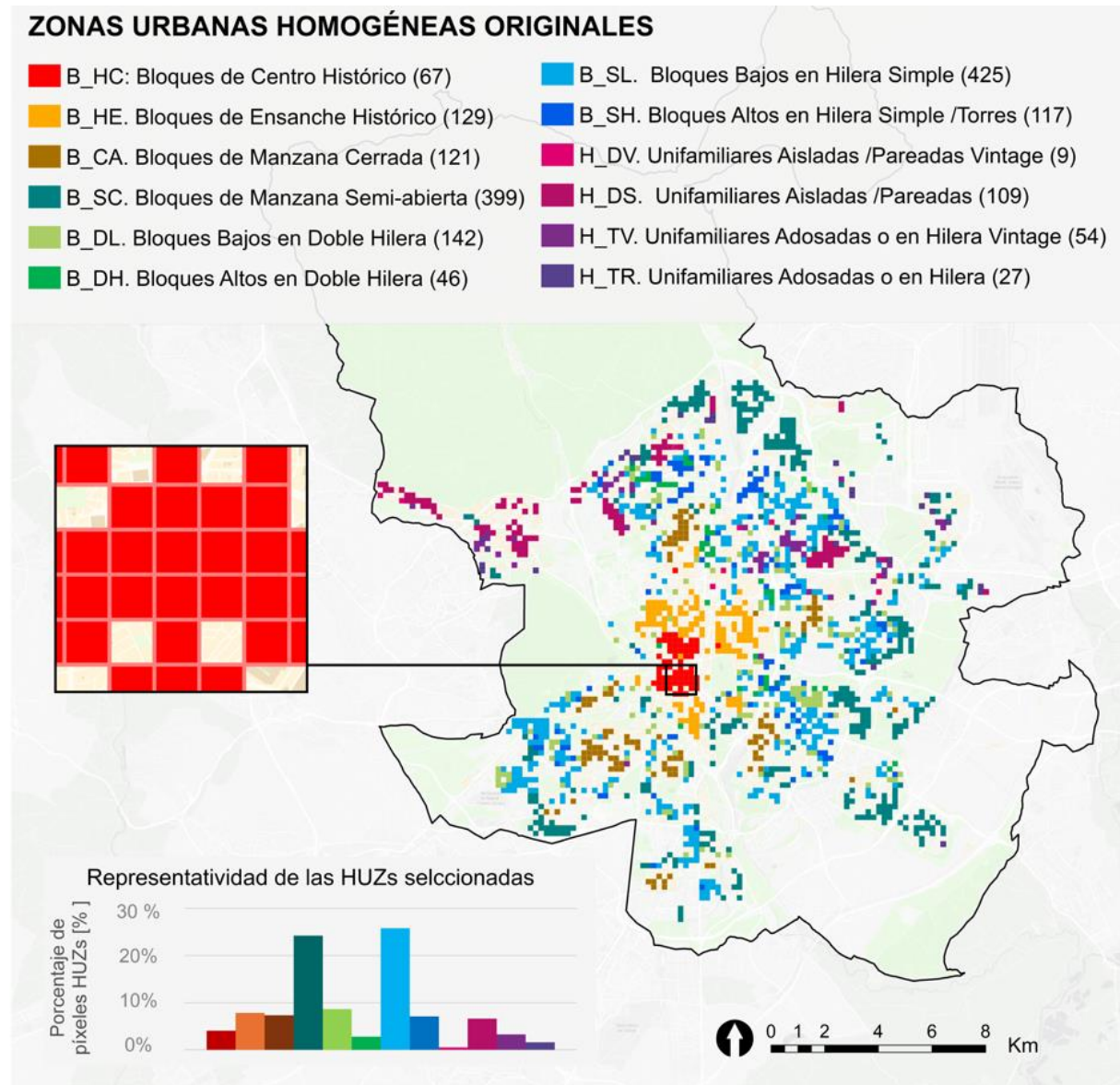


Figura 28. Zonas Urbanas Homogéneas originales de Madrid (HUZ-Orig): representación geográfica y representatividad.

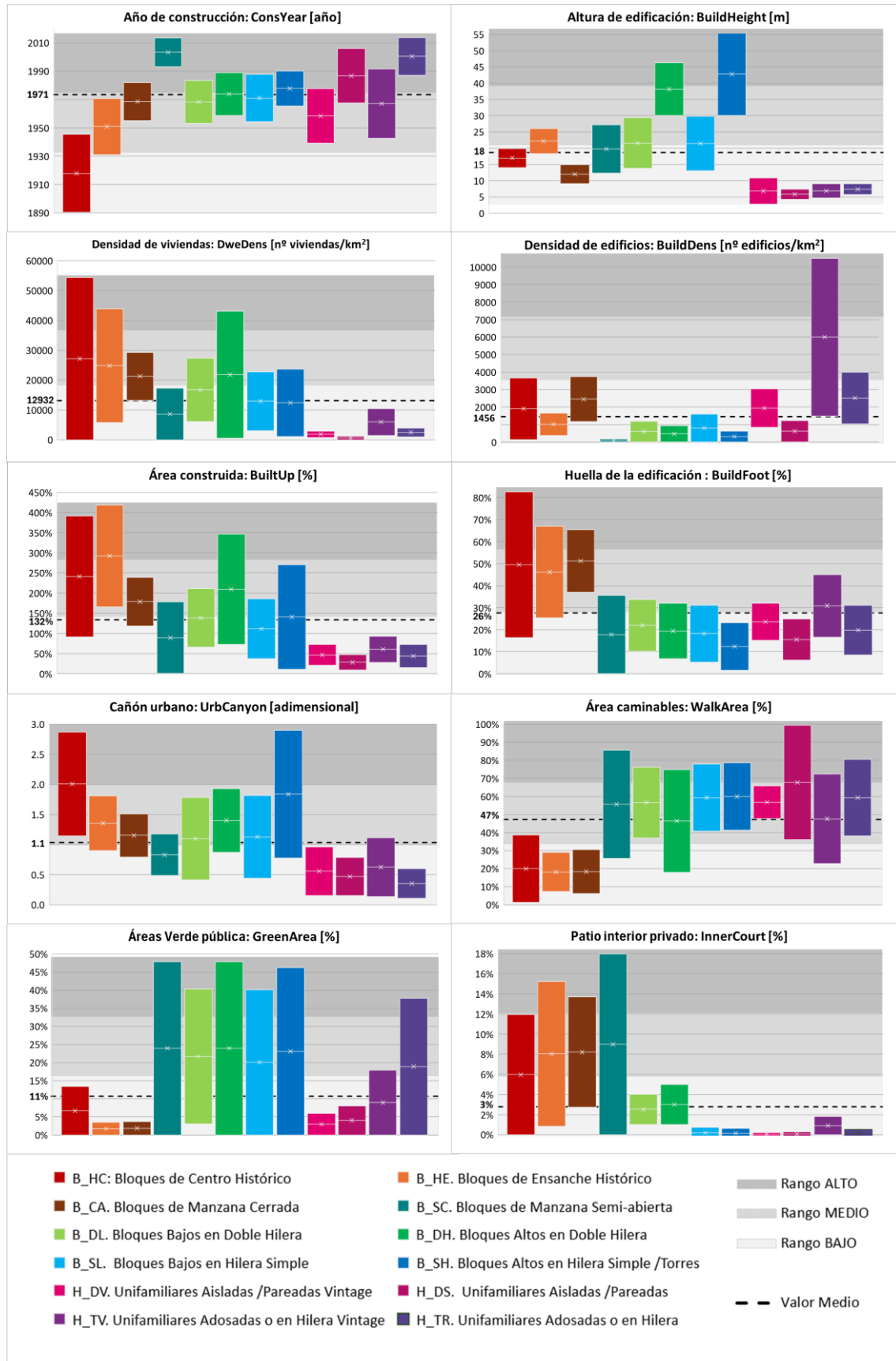


Figura 29. Promedios y rangos de los indicadores de bloque de manzana urbana para las HUZs de Madrid

5.3.2. Clasificación y representación de HUZs definitivas

Esta sección representa la aproximación HUZ aplicada a la ciudad de Madrid una vez evaluadas las cuatro fases de la metodología. La Figura 30 muestra la clasificación definitiva de las clases HUZs (HUZ-PixelExt), cubriendo el total de 3.906 píxeles, lo que implica el 100% de cobertura y 156 km² de área residencial. De forma generalizada se mantienen las mismas proporciones de representatividad que las indicadas en la Figura 28 para las HUZs originales. Las tipologías más numerosas son los Bloques Bajos en Hilera Simple (B_SL) y los Bloques de manzana semiabierta (B_SC), albergando cada una de ellas casi un cuarto de la superficie residencial (26 y 24% respectivamente). A estos valores lo siguen la clase Bloques bajos en Hilera Doble (B_DL) con un 12% de frecuencia. Por otro lado, las HUZs menos comunes son los Bloques Altos en Hilera Doble (B_DH) y las Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage (B_DV), con sólo un 3% de representatividad. El resto de las clases presentan porcentajes similares, con rangos que van entre el 6% y 8%.

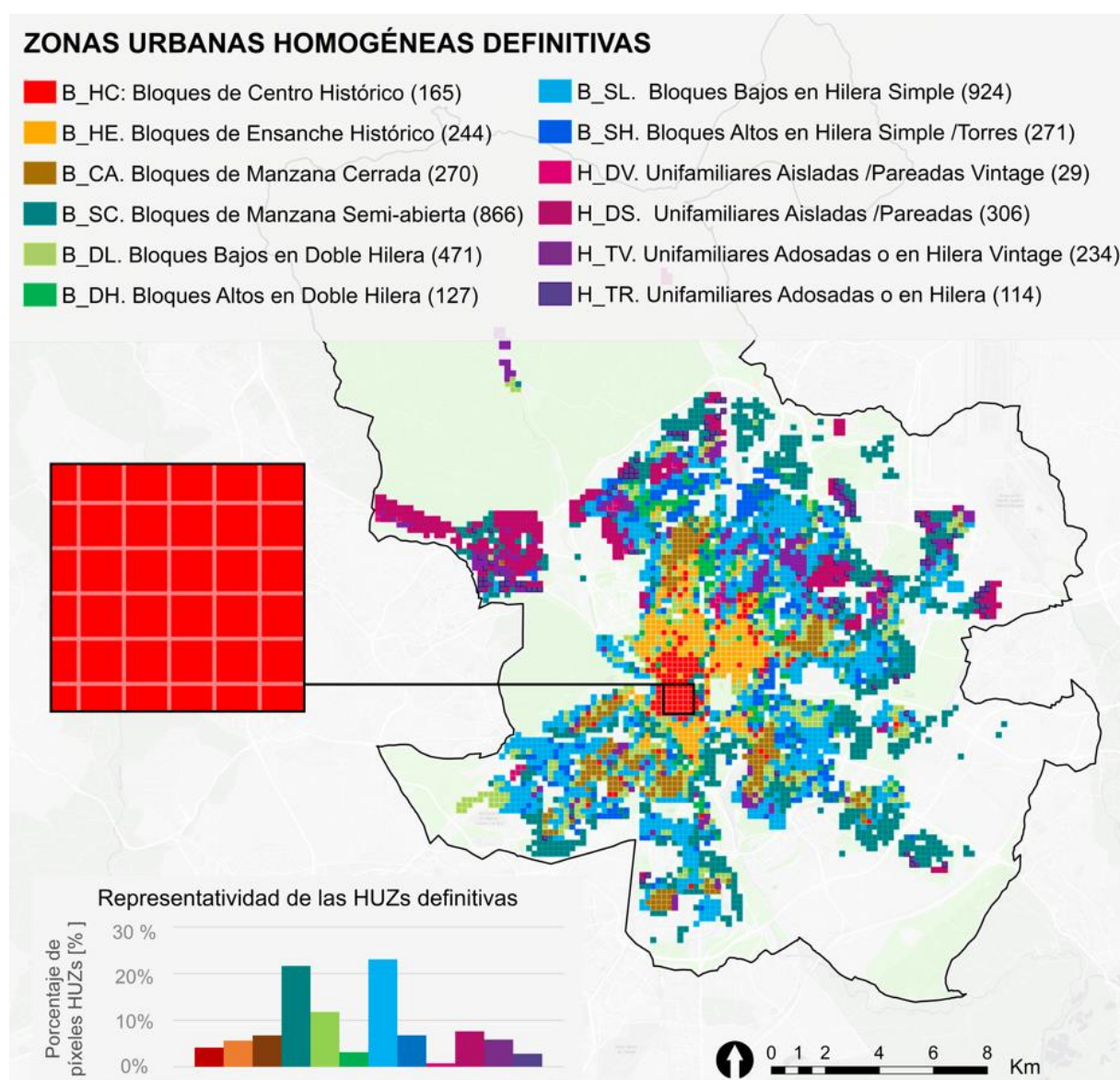


Figura 30. Zonas urbanas homogéneas definitivas de Madrid: representación geográfica y representatividad

5.3.3. Interpretación de las clases HUZs

Los indicadores asociados a la arquitectura, la morfología urbana y las características de la superficie identificadas se muestran determinantes a la hora de clasificar los bloques urbanos de manzana. Por ejemplo, a través del año de construcción (histórico o moderno), la superficie construida (bloques o viviendas unifamiliares) y las áreas transitables o de patio interior (compactas o dispersas) es posible identificar puntos en común que caracterizan el patrón de desarrollo urbano. Además, mediante la representación GIS se pueden identificar y localizar los cuatro grandes grupos urbanos en Madrid. Los primeros asentamientos de la ciudad consistieron en manzanas compactas, dando lugar progresivamente a desarrollos urbanos modernos y dispersados basados en una estructura radial y más alejados de las construcciones históricas ubicadas en el centro de la ciudad. Las capas periféricas finales están cubiertas principalmente por nuevas áreas semiabiertas y viviendas unifamiliares. Sin embargo, la definición exhaustiva de las HUZ dentro de estos grupos urbanos requiere la implementación del conjunto completo de indicadores. Por ello, los resultados obtenidos se describen en detalle en los siguientes apartados, a nivel general de grupo urbano y específicamente para cada una de las clases HUZ:

Áreas de bloques compactos en manzana cerrada, de finales del S.XVIII hasta la primera mitad del S.XIX. Se consolidaron en el centro de la ciudad y se expandieron hacia el anillo periférico principal, representando el 16 % de los grupos identificados. Esta categoría se caracteriza por un elevado número de viviendas por bloque y destaca por tener aproximadamente la mitad de su superficie cubierta por edificios residenciales. Como resultado, las áreas peatonales y los espacios verdes públicos tienen el porcentaje más bajo de todas las HUZs, en torno al 20% y menos del 10%, respectivamente. Por otro lado, la superficie de los patios interiores supera la media de las clases de HUZs. Esto podría explicarse por la necesidad de proporcionar luz natural a las habitaciones interiores de las viviendas, que están altamente concentradas en áreas construidas por encima de la media. Este grupo está compuesto por:

- La clase de Bloques del Casco Histórico (B_HC) que incluye los edificios más antiguos concentrados en el centro de la ciudad. Estos edificios fueron construidos entre las últimas décadas del siglo XIX y las primeras del siglo XX. Sus bloques de altura media a baja, combinados con calles estrechas, presentan las proporciones de cañón urbano más altas y las medias más elevadas.
- Los Bloques de Ensanche Histórico (B_HE) abarcan las áreas con mayor densidad edificatoria dentro de las HUZs, como consecuencia de ser los edificios más altos de este grupo.
- Los Bloques Bajos de Manzana Cerrada (B_CA) presentan las medias más elevadas y los rangos más amplios de densidad edificatoria dentro de la tipología de vivienda colectiva. Esto se debe a la combinación de una gran ocupación del suelo en áreas compactas con bloques de baja altura.

Áreas de edificación abierta con construcciones de mediados y finales del siglo XIX. Estas áreas, que se encuentran entre el anillo periférico principal y el último anillo periférico, están dotadas de amplios espacios verdes públicos y zonas peatonales. Surgieron rápidamente entre mediados de los años 50 y finales de los 80, representando la mayor parte de las áreas residenciales (45% de las HUZs). Este grupo urbano presenta valores de huella de edificación medios o bajos, similares a otras tipologías HUZs,

pero con una distribución diferente en términos de forma y altura. Los bloques en hilera simple tienen valores de patios interiores cercanos a cero, a diferencia de los bloques de doble hilera, que cubren hasta el 5 % del área total de patios privados. Además, estas tipologías de hileras dobles conducen a una mayor densidad de viviendas en comparación con las hileras simples. Por otro lado, las tipologías de baja altura presentan rangos de altura de 13 a 30 m, mientras que los bloques de gran altura o torres, contruidos un poco más tarde, tienen los valores más altos de todas las HUZ, con una media de 36-40 m. Por lo tanto, presentan una mayor proporción de cañón urbano, una mayor área construida, y los espacios verdes son ligeramente superiores en las tipologías de alta altura, respecto a las de baja altura dentro de este grupo urbano en edificación abierta. La combinación de estas hileras simples o dobles, así como bloques de baja o gran altura, conforma las siguientes clases HUZ dentro de este grupo:

- Los Bloques Bajos en Hilera Doble (B_DL) presentan los valores más altos de ocupación del suelo dentro del grupo de edificación abierta debido a la densidad de las viviendas en doble hilera combinada con su baja altura.
- Los Bloques Altos en Doble Hilera (B_DH) es la clase menos frecuente en este grupo, representando solo el 3 % de los píxeles de las HUZs. Debido a su alto valor de densidad de viviendas y altura, muestran los valores de área construida más altos dentro del grupo.
- Los Bloques Bajos en Hilera Simple o Torres (B_SL) son la clase más representativa, con el 26 % de los píxeles de la ciudad. Dentro de este grupo urbano de edificación abierta, la categoría B_SL presenta la mayor densidad de edificios y los valores de área construida más bajos.
- Los Bloques Altos en Hilera Simple o Torres (B_SL) presentan los edificios más altos de todas las tipologías HUZ. Por lo tanto, la densidad de edificios y la ocupación del suelo son más reducidas en comparación con otras clases de este grupo.

Zonas de bloques semiabiertos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Estas zonas están localizadas en el último anillo de la periferia de la ciudad. Cabe destacar que, estas zonas combinan el mayor porcentaje de superficie de patios interiores por edificio, lo que generalmente se atribuye a áreas de edificación en manzana cerrada, pero en este caso se distribuye en un número reducido de edificios rodeados de amplias áreas peatonales y zonas verdes, más típicas de las zonas de edificación abierta. Este grupo urbano se compone de:

- Los Bloques de Manzana Semiabiertos (B_SC) son una de las tipologías urbanas más modernas. Representan el 25 % de las HUZs clasificadas y son la segunda clase más frecuente, con un 22 % de representatividad. B_SC tiene, con diferencia, la densidad edificatoria más baja entre todas las clases. Dentro de la categoría de tipología de bloques colectivos, B_SC presenta la menor densidad de viviendas, así como la menor área construida.

Áreas de viviendas unifamiliares del primer tercio del siglo XIX y principios del siglo XX. Estas zonas se caracterizan por sus bajos valores de densidad de viviendas, ya que cada edificio alberga una única vivienda y representan el 17% de las HUZs. Las viviendas unifamiliares tipo vintage fueron construidas a partir de los años 40 hasta aproximadamente los años 80. A partir de esta época surge una tipología

unifamiliar más reciente, que es la que se sigue desarrollando hoy en día. Estas viviendas se clasifican en tipo aisladas o pareadas, con una menor densidad de viviendas y edificios, frente a las de tipología adosa o hilera con valores de densidad notablemente superiores. Se ubican principalmente en la capa periférica exterior de la ciudad, y comparten aproximadamente el mismo periodo y en ocasiones, la misma ubicación que las zonas de bloques abiertos y semiabiertos. Las áreas de casas unifamiliares siguen la tendencia de las edificaciones abiertas en cuanto a su baja ocupación del suelo y áreas de patios interiores prácticamente inexistentes, ya que albergan viviendas unifamiliares de baja altura sin habitaciones interiores. Por lo tanto, las áreas construidas, así como las proporciones de cañón urbano, son las más bajas de todas las HUZs. Cuatro HUZs representativas forman este grupo:

- Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage (H_DV) es la tipología unifamiliar más antigua. La tipología aislada o adosada albergan una cantidad muy baja de viviendas, aunque su huella de edificación es mayor que la de los grupos urbanos de edificación abierta y semiabierta. Pese a tener un alto porcentaje de áreas caminables, esta superficie apenas cuenta con áreas verdes públicas, anteponiéndose mayoritariamente los jardines privados dentro de la vivienda.
- Las Unifamiliares Aisladas o Pareadas (H_DS) siguen la misma tendencia que su tipología análoga vintage. Sin embargo, destaca por tener los valores más bajos de altura de edificios y densidad de viviendas de todas las HUZs y, en consecuencia, la mínima área construida.
- Las Unifamiliares Adosadas o en Hilera Vintage (H_TV) se caracterizan por su elevada densidad de edificios, la más alta de todas las HUZs y por ello es la clase de las viviendas unifamiliares con mayor huella de la edificación, cañón urbano y la que alberga el mayor número de viviendas. En este caso las zonas públicas destinadas a las áreas verdes son mayores respecto a las tipologías aisladas o pareadas, pese a presentar menor porcentaje de áreas caminables.
- Las Unifamiliares Adosadas o en Hilera (H_TR) son la tipología unifamiliar más moderna. Sigue patrones similares a su equivalente vintage, pero con una densidad de edificios notablemente inferior, lo que se traduce en una menor densidad de viviendas, área construida y huella de edificación. Además, la superficie de zonas verdes públicas es la mayor del grupo, muy superior al grupo de edificación de manzana cerrada y próximo a los grupos de edificación abierta y semiabierta.

5.4. Conclusiones

Este capítulo ha desarrollado un sistema de clasificación urbana sistemática para el análisis energético edificatorio, basado en la identificación, clasificación y caracterización mediante indicadores urbanos relevantes. Las principales conclusiones que se extraen de la aproximación de Zonas Urbanas Homogéneas (HUZ) son las siguientes:

- Se han identificado 12 tipologías representativas HUZs, que se han agrupado en grandes grupos:
 - a) Áreas de bloques compactos en manzana cerrada, de finales del S.XVIII hasta la primera mitad del S.XIX, que incluyen tipologías de Bloques del Casco Histórico (B_HC) que incluyen alto valor patrimonial, Bloques de Ensanche Histórico (B_HE) y Bloques Bajos de Manzana Cerrada (B_CA).

- b) Áreas de edificación abierta con construcciones de mediados y finales del siglo XIX, que engloban a los Bloques Bajos en Hilera Doble e Hilera Simple (B_DL y B_SL), los cuales representan el grupo más numeroso, cubriendo un 35% de la superficie (32 km²) y los Bloques Altos en Hilera Doble e Hilera Simple/Torres (B_DH y B_SH). c) Zonas de bloques semiabiertos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, donde se encuentran las edificaciones colectivas más modernas con los Bloques de Manzana Semiabiertos (B_SC). d) Finalmente, las áreas de viviendas unifamiliares del primer tercio del siglo XIX y principios del siglo XX que recogen las viviendas Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage y Modernas (H_DV y H_DS) y las viviendas Unifamiliares Adosadas o en Hilera Vintage (H_TV y H_TR)
- La aproximación HUZ proporciona un sistema innovador para entender el comportamiento energético del bloque residencial urbano desde una perspectiva más integral, que considera tanto las características locales del edificio como las características urbanas circundantes próximas. Este enfoque novedoso es relevante debido a la fuerte interdependencia entre los edificios y su entorno, que no es solo producto de ciertos edificios que requieren condiciones específicas (por ejemplo, los edificios más altos necesitan más espacio entre ellos para garantizar el acceso solar), sino también debido al vínculo entre el desarrollo urbano y su contexto socioeconómico e histórico particular. Por lo tanto, el esquema HUZ tiene el potencial de ser un marco útil para futuras evaluaciones energéticas de las ciudades, facilitando el análisis y las intervenciones de renovación energética.
 - Como novedad, la clasificación HUZ está diseñada para aplicarse globalmente, pero ajustando sus parámetros de manera local. Con este fin, el enfoque propuesto se divide en tres fases estandarizadas (recolección de datos urbanos, caracterización de clústeres urbanos y definición de HUZs) para determinar los HUZs a través de un proceso estadístico que han permitido localizar áreas que pertenecen al 100% a una tipología (HUZPix-Orig). Adicionalmente, se ha realizado un ajuste de ponderación de indicadores y localización para calificar completamente la ciudad (HUZPix-Ext). Se utiliza un conjunto de indicadores constructivos, morfológicos y de superficie basados en datos urbanos regionales de cada región. Por lo tanto, el método HUZ adapta el proceso a cada ciudad o región a pequeña escala, con datos urbanos más detallados y con rangos flexibles de indicadores urbanos, lo cual podría ser más adecuado para estudios locales de energía de edificios.
 - Todos los indicadores urbanos resultaron ser relevantes para identificar los HUZs. Además de los indicadores de huella del edificio o áreas verdes públicas, que son ampliamente utilizados para identificar desarrollos urbanos de manzana cerrada o edificación abierta, otros parámetros menos comunes, como las áreas caminables o los patios interiores privados, también han demostrado ser útiles para esta diferenciación. Dentro del grupo urbano cerrado, el año de construcción y la altura de los edificios son relevantes para identificar sus HUZs. La altura del edificio y la superficie de los patios interiores también son determinantes en las áreas de bloques abiertos, mientras que la densidad de los edificios es crucial para clasificar las áreas de bloque semiabiertos. Finalmente, las

casas unifamiliares presentan aspectos de diseño que facilitan su identificación con respecto a otros grupos urbanos de HUZs, a través de la altura del edificio, la superficie construida o el cañón urbano. Sin embargo, dentro de estas casas unifamiliares, la densidad de viviendas y, en particular, la cantidad de áreas verdes públicas y el año de construcción permiten la diferenciación entre viviendas unifamiliares aisladas o en hilera, así como tipologías antiguas y más recientes.

- Cabe destacar que basarse sólo en el año de construcción o tipología edificatoria (viviendas colectivas y unifamiliares) puede llevar a imprecisiones que no tienen en cuenta las variaciones entre la planificación y entrada en vigor de la normativa y su aplicación reales, así como las diferentes planificaciones dentro de la ciudad. Este es el caso de los bloques bajos en hilera, que, pese a que fueron proyectados durante los años 50 y 60, la mayoría datan de años de construcción casi una década después. Esta situación también ocurre en el caso de los edificios de Ensanche o los bloques semiabiertos. Otro ejemplo sería la construcción de edificaciones del mismo tipo coetáneas, pero con una planificación urbana completamente diferente, como por ejemplo los bloques de Ensanche y los bloques bajos de manzana cerrada.
- Los HUZs y sus indicadores pueden variar regionalmente, por lo que esto podría verse como una vulnerabilidad potencial del esquema de clasificación, dificultando la comparabilidad entre estudios. Sin embargo, es muy difícil, si no casi imposible, encontrar dos tejidos urbanos idénticos pertenecientes a dos ciudades diferentes. Evaluar el grado de similitud entre los dos suele depender de la visión del investigador, quien puede otorgar más importancia a ciertos indicadores que a otros, siendo en ocasiones esta aproximación de forma cualitativa. Para mejorar este proceso de toma de decisiones y estandarizar la comparación entre tejidos urbanos en diferentes ciudades, podría ser recomendable un proceso estadístico como el propuesto en este trabajo.

En conclusión, al entender las ciudades como metabolismos antropogénicos, donde un cambio afecta al sistema completo, las HUZ pueden funcionar como un instrumento clave para la caracterización energética y térmica edificatoria. Esto acoplado con otros indicadores facilita abordar otras vulnerabilidades relacionadas con la sostenibilidad, el bienestar y los aspectos socioeconómicos.

6. Zonas Urbanas Homogéneas. Edificios Representativos

Además del clima y la contextualización urbana, las características del edificio son esenciales en la evaluación térmica. Aspectos como la composición de los elementos constructivos, la distribución de viviendas y su ubicación o las condiciones de contorno de la envolvente definen el intercambio térmico interior-exterior del edificio. Este concepto está vinculado a las necesidades energéticas para garantizar unos mínimos de habitabilidad térmica en el interior de los hogares. Por lo tanto, los marcos de trabajo enfocados en la rehabilitación energética deben considerar como clave estos aspectos arquitectónicos, constructivos o de configuración espacial. En este sentido, el objetivo principal de este capítulo se centra en la descripción del proceso de identificación, selección y caracterización de edificaciones representativas para las clases HUZs definidas anteriormente. Con tal fin, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- i) Descripción de las principales iniciativas relacionados con la clasificación edificatoria desde la perspectiva de análisis energético (Sección 6.1.)
- ii) Identificación y localización de los edificios representativos HUZs, mediante el acoplamiento de la escala urbana, edificatoria y constructiva (Sección 6.2)
- iii) Caracterización del edificio representativo HUZs, considerando sus características geométricas y distribución de espacios, sus sistemas constructivos y materiales, así como sus condiciones de uso y ocupación (Sección 6.3.)

6.1. Iniciativas e indicadores para clasificar el parque edificatorio.

Para la evaluación energética edificatoria, las principales iniciativas desarrolladas en Europa y en otros lugares, se centran en la evaluación a través del modelado BEM y generalmente a través de una aproximación *bottom-up*. Para ello, se clasifica el territorio en base a arquetipos representativos, cuyas características térmicas se pueden inferir al resto de la ciudad, en base a características edificatorias comunes. Como regla general, se centran en las características del edificio de forma independiente, sin considerar su entorno urbano.

Dicha clasificación suele basarse en indicadores como el año de construcción, la altura o la tipología. Un ejemplo de gran relevancia es la llevada a cabo a través del Proyecto TABULA-EPISCOPE, una base de datos de clasificación de edificios europea que combina diversos arquetipos de edificio con el año de construcción y la región climática para el cálculo energético [302]. Por otro lado, la base de datos GENIUS clasifica los edificios en Francia según la forma urbana, el uso del edificio, la fecha de construcción y la ubicación geográfica, y luego alimenta estos datos para modelar el balance energético de la superficie urbana con Town Energy Balance [322]. A nivel estatal, el IDAE definió tipologías representativas de edificios para evaluar el rendimiento energético de los edificios por período de construcción, área útil (para viviendas unifamiliares) y número de pisos (para unidades multifamiliares) [301]. Además, la anteriormente mencionada ERESEE 2020 también trabaja a partir de la segmentación del parque residencial de viviendas en España, basándose en la tipología edificatoria

(plurifamiliar o unifamiliar), año de construcción y altura para cuantificar el potencial de la rehabilitación energética [323].

Los principales factores que influyen en la evaluación energética y térmica edificatoria se pueden agrupar en constructivos, características geométricas y comportamiento de los usuarios [324].

Dentro de las características constructivas los factores más influyentes destacan la transmitancia térmica de los elementos constructivos (U), el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), la ratio de ventana-muro (*Window-Wall Ratio*, WWR) o la infiltración, combinado éstos dos últimos también aspectos geométricos. Para la definición de estas variables, se recurre comúnmente al año de construcción, asumiendo propiedades similares contextualizando la tecnología y normativa, como describe la Sección 3.3 y la Sección 3.4 [325], [326]. Por ejemplo, el año de construcción permite estimar las capas de los diferentes elementos constructivos en base a la normativa constructiva del momento. En ese sentido, en España la publicación de la NBE-CT-79 se toma como momento clave a la hora de categorizar si los edificios tienen aislamiento y consecuentemente aproximar su valor de transmitancia térmica [192]. Las dimensiones o altura mínimas, así como los materiales también son valores frecuentemente definidos en las regulaciones técnicas, los cuales ayudan a estimar valores de ventilación e infiltración. Adicionalmente, el año de construcción, combinado con la altura y tipología también permite aclarar estas características térmicas, en base a su sistema estructural. La construcción tradicional basada en muros de carga que necesitan mayor espesor y están limitados en cuanto a las dimensiones de huecos. Por el contrario, el sistema estructural reticular de pilares y vigas permite reducir el espesor del muro y las dimensiones de los huecos son más versátiles, lo que admite dimensionar mejor la radiación solar, aspectos vinculados con la transmitancia e inercia térmica, la ganancia solar o el ratio de muro-ventana [327], [328]. Para la definición de estos valores, se recurre a la consulta de documentación original en archivos que se toman como ejemplo para la clase de análisis, la revisión bibliográfica, o se asume el valor normativo límite, en los casos que exista.

Por otro lado, las características geométricas incluyen variables como el volumen, la orientación, la superficie construida y sus diferentes usos (viviendas, zonas comunes, locales comerciales, garajes o sótanos), así como la superficie de contorno y su porcentaje de envolvente (muros, cubierta, suelo, huecos) o área adiabática. Además, la altura, número de plantas o la cantidad de viviendas, o la localización de la vivienda dentro del edificio también son factores clave, dependiendo todas ellos de la exposición a las condiciones circundantes a la vivienda. Para la definición de estos parámetros, geométricos se suele tomar los propios del arquetipo identificado como representativo, recurrir a bases de datos como el catastro o asumir valores medios estadísticos en función de la tipología (vivienda unifamiliar o unifamiliar) y altura de la edificación [324]. Por ejemplo, las viviendas ubicadas en las últimas plantas de los edificios, especialmente aquellas con cubiertas planas, alcanzan temperaturas más extremas en verano e invierno, en comparación con las plantas medias que ofrecen el mejor comportamiento en ambas estaciones [329]. De forma similar, los edificios colectivos suelen tener mayores usos distintos al residencial, que incluyen locales comerciales o zonas comunes,

teniendo éstos con perfiles de ocupación e intensidades energéticas diferentes al residencial, afectando al cómputo de ganancias y pérdidas energéticas de las viviendas.

Relacionado con esta idea, el comportamiento de los usuarios está vinculado con la intensidad de los sistemas. Dentro de este grupo se encuentran las cargas internas generadas por los usuarios y equipos, los perfiles de ocupación y sus usos de sistemas, principalmente climatización, agua caliente sanitaria (ACS), ventilación e iluminación. Pese a que se estiman diferencias evidentes entre el comportamiento real y establecido por los códigos normativos, su ajuste resulta complicado, por lo que se suele definir los estándares, como el que ofrece el CTE en el caso de España [330]. En este sentido la clasificación de tipología edificatoria permite diferenciar entre consumos residenciales y no residenciales.

Finalmente, cabe destacar que, aunque no está recogido de forma explícita en las clasificaciones anteriores, otro factor determinante está asociado a la localización de las viviendas o al tipo de promoción. Por ejemplo, como se ha mencionado en Sección 3.3 y la Sección 3.4, frente a la propuesta ordenada e higienista de las viviendas del Ensanche, al mismo tiempo surgieron asentamientos informales, generalmente autoconstruidos, en sus límites. En algunas de estas áreas, que fueron posteriormente planificadas formalmente, así como en nuevas zonas periféricas, la promoción de vivienda pública ha tenido gran peso. Esta vivienda social ha estado regida por unos condicionantes normativos y poblacionales específicos, especialmente durante el franquismo con la construcción de poblados de absorción, mínimos o dirigidos. Pero también la especulación inmobiliaria de la VPO durante los años 90, que terminó con la burbuja inmobiliaria en 2008, potenció una forma de construir en la que primaba la cantidad frente a la calidad [258], [331], [332]. Estos hechos están vinculados a una forma de construir en cuanto a las prestaciones de los materiales, nivel de acabado o instalaciones que difiere de la vivienda ubicada más próxima al centro urbano o a la promoción privada. Finalmente, cabe destacar la descontextualización de estas clasificaciones a nivel nacional más allá de definir su tipología edificatoria, diferenciando principalmente entre viviendas unifamiliares y en bloque.

6.2. Identificación de HUZs representativas. Aproximación edificio

Con el fin de caracterizar las edificaciones representativas de las diversas clases de bloque de manzana urbano HUZ, se ha cambiado la escala de unidad de análisis, pasando de la aproximación cobertura de suelo (HUZ-Pix), a área de influencia del edificatorio (HUZ-Buffer). Una vez caracterizada la aproximación del entorno urbano, este enfoque edificatorio, permite, por un lado, ajustar el modelo de clasificación HUZ y ahondar más en las características edificatorias para el estudio del comportamiento energético y térmico. Para ello, se recurre a la identificación de edificaciones representativas HUZs, basándose en la combinación de varios niveles. La perspectiva urbana, mediante las HUZ-Pix, la perspectiva edificatoria, mediante la aplicación de la metodología HUZ a escala edificio (HUZ-Buffer) y la perspectiva constructiva, en la que se acoplan las HUZs-edificio a las clasificaciones edificatorias tradicionales para la caracterización energética (HUZ-Cons). La combinación de estas capas permite la identificación y localización de los edificios representativos HUZs.

6.2.1. Nivel edificatorio. Área de influencia edificatoria HUZ.

La metodología de HUZ descrita anteriormente, está basada en la cuantificación de valores tomando como unidad de análisis urbano el pixel, sobre el que se basan los cálculos de los indicadores de cobertura de suelo, morfológicos y arquitectónicos. Esto aporta gran información en el contexto de bloque urbano, sin embargo, limita la identificación de algunas edificaciones. Por ejemplo, zonas en las que el tejido es muy heterogéneo, donde se mezclan varias HUZs o aquellas tipologías cuya huella de edificación es baja-media, pero que alojan un gran número de edificios, como puede ser el caso de viviendas unifamiliares. Además, la identificación de un edificio facilita el futuro análisis energético edificatorio.

En este sentido, se ha hecho un ajuste metodológico, considerando los límites ya definidos anteriormente para la metodología HUZ, pero repitiendo el análisis a nivel edificio. Para ello, se han definido cada uno de los indicadores anteriores, basándose esta vez en el área de influencia del edificio (*buffer*) de radio de 112,84 m, que se corresponde con la misma superficie que ha sido usada para el pixel (40.000 m²). De esta forma se definen los nuevos HUZ-BuffOrig, así como sus posteriores ajustes de extensión basado en la ponderación de indicadores y proximidad (HUZ-BuffExt), para un total de 106.613 edificaciones residenciales. A modo de ejemplo la Figura 31 muestra la representación de área de influencia para un edificio, representado como un punto.

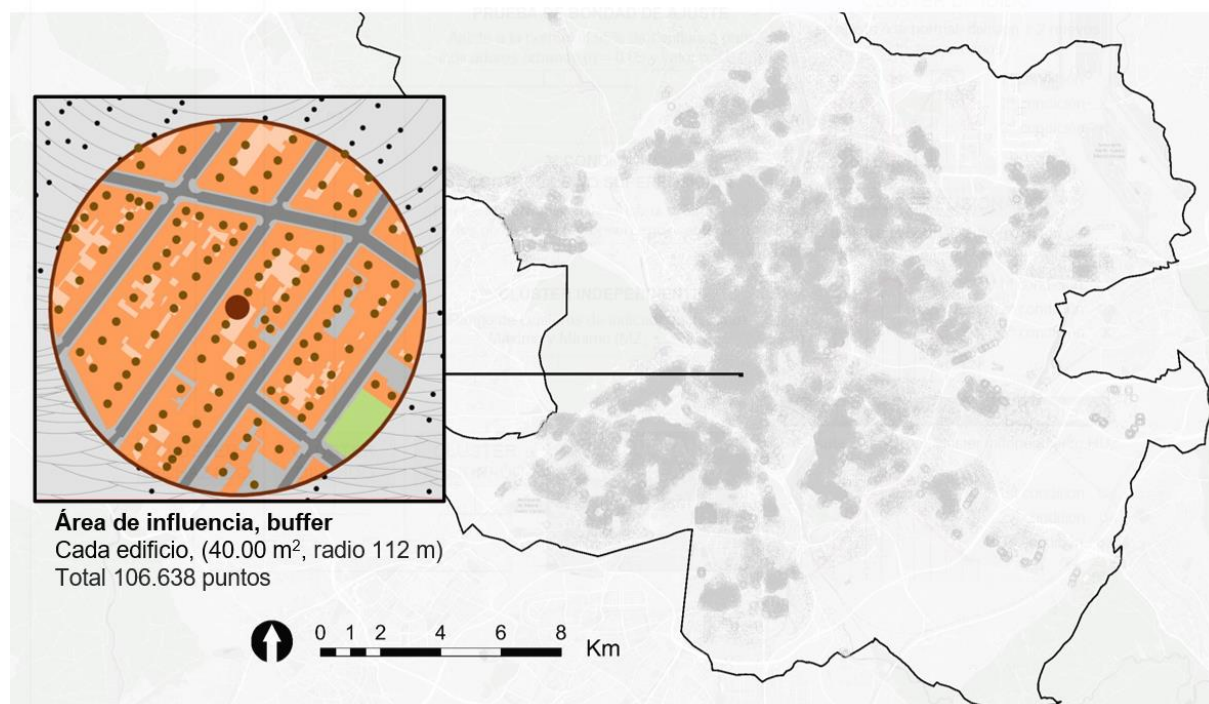


Figura 31. Definición de área de influencia (*buffer*) para cada uno de los edificios residenciales de Madrid.

Para los cálculos de los HUZ-BuffOrig se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los indicadores asociados a características del edificio como el año de construcción (ConsYear) o la altura de la edificación (BuildHeight), se han tomado los valores del propio edificio.

- Los indicadores asociados al edificio en proporción con la superficie de píxel como la densidad de viviendas (DweDens), la densidad de edificios (BuildDens), el área construida (BuiltUp), la huella de la edificación (BuildFoot) o el patio interior privado (InnerCourt), se han calculado los edificios dentro del área de influencia, a los que se les ha asimilados que tienen los mismos valores que el edificio estudiado.
- Los indicadores asociados a las superficies que rodean el edificio, como el área caminable (WalkArea) o áreas verdes públicas (GreenArea), se han calculado considerando las zonas de este tipo que intersecan con el área de influencia.
- Finalmente, aquellos indicadores que combinan características propias del edificio las superficies que los rodean como el cañón urbano (UrbCanyon), se han combinado los procesos anteriores.

Con estos nuevos valores de indicadores, se ha repetido el análisis de clasificación usando los límites y criterios de ponderación de indicadores anteriormente definidos en la Sección 5.2 (HUZ-BuffExtInd). Además, aquellos edificios cuya clasificación es inferior al 85% a una clase HUZ, se ha asimilado la tipología HUZ de la aproximación pixel (HUZ-BuffExtLoc).

De tal forma, Figura 32 muestra la clasificación HUZ desde la aproximación edificio. Se observa que en este caso el mayor número de edificios clasificados pertenecen a la categoría TV con un 22% de representatividad, seguidos de SL, HC y CA, con un 16%, 15% y 14% respectivamente. Estas categorías corresponden con una alta densidad edificatoria o representatividad en la anterior clasificación HUZ basada en la aproximación pixel. Por el contrario, SH y DV sólo representan el 1% de las edificaciones, con bajos valores de densidad edificatoria o representatividad. Mientras que HE, SC, DL, DH DS y TR muestran porcentajes en tono al 3-9 %.

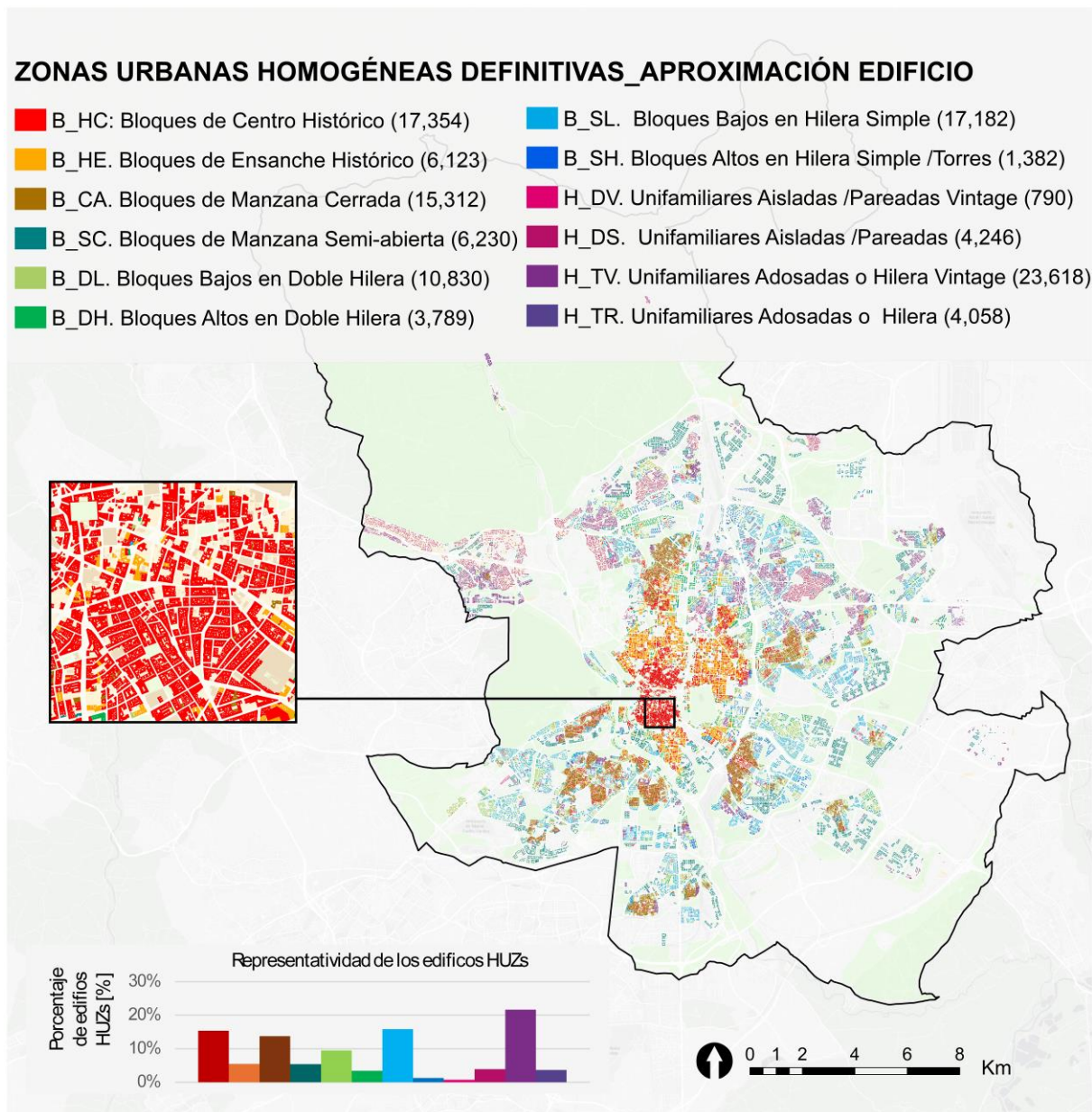


Figura 32. Zonas urbanas homogéneas definitivas de Madrid. Aproximación edificio: representación geográfica y representatividad

Sin embargo, como muestra la Figura 33, estos porcentajes cambian si tenemos en cuenta la huella edificatoria o la superficie construida, aproximándose mucho más a los obtenidos anteriormente en la clasificación HUZ desde la aproximación píxel. Desde el punto de vista de la huella edificatoria (Figura 33.a), cabe destacar que estos porcentajes son más elevados en las tipologías HC, HE y CA, respecto a la aproximación anterior de píxel, coincidiendo con su alto porcentaje de área construida y bajas superficies caminables o de zonas verdes, las cuales se hacen más evidentes si tenemos en cuenta la superficie construida del edificio (Figura 33.b), para HC y HE. También los valores de algunas tipologías unifamiliares como DS y especialmente TV aumentan respecto la aproximación píxel si consideramos la representatividad basada en la huella edificatoria (Figura 33.a), lo que podría indicar una infravaloración anterior debido a su baja influencia en tejidos heterogéneos. Sin embargo, desde el

punto de vista de la superficie construida (Figura 33.b), estas tipologías unifamiliares disminuyen principalmente debido a su baja altura, al contrario que ocurre para la tipología DL.

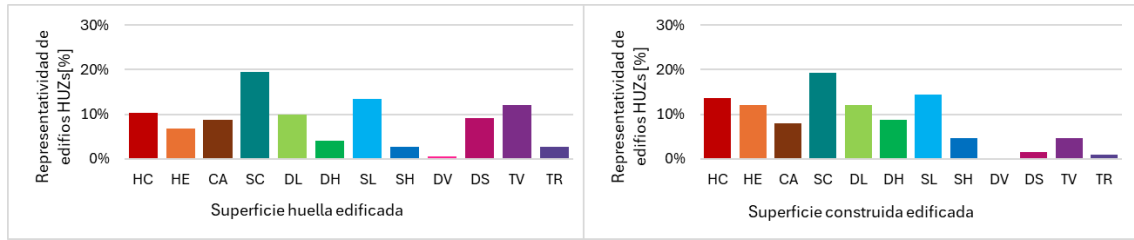


Figura 33. Porcentaje de representatividad de los edificios HUZs según su aproximación. a) Considerando su huella edificatoria (derecha). B) Considerando su superficie construida (izquierda)

Finalmente, a modo de comparativa, Tabla 6, muestra las diferencias entre la aproximación de cobertura de suelo (*pixel*) y área de influencia edificio (*buffer*) para la clasificación del terreno, considerando los ítems que pertenecen al 100% a una clase (originales) y los posteriores ajustes de ponderación de indicadores y proximidad (ampliadas). Cabe destacar que esta clasificación ampliada permite categorizar la totalidad de los ítems residenciales clasificados.

	TOTAL_ítems residenciales clasificados	Aproximación urbana de cobertura de suelo (HUZ-Pixel)			Aproximación edificatoria de área influencia (HUZ-Buff)		
Original	El 100% de los indicadores analizados pertenecen a una clase HUZ	HUZ-PixOrig.	1626	42%	HUZ-BuffOrig.	9624	9%
Ampliación indicadores	El ≥85% de los indicadores analizados pertenecen a una clase HUZ	HUZ-PixExInd	3480	89%	HUZ-BuffExInd	65217	61%
Ampliación Localización	Para valores < 85% de pertenencia, se toma la clase del HUZ original más cercano	HUZ-PixExLoc	3906	100%	HUZ-BuffExLoc	106613	100%

Tabla 6. Clasificación HUZ desde la aproximación urbana de cobertura urbana de suelo (*pixel*) y aproximación edificatoria de área de influencia (*buffer*), cuantificando sus ítems originales y ampliados.

6.2.2. Nivel constructivo. Clasificación para la caracterización energética.

Para la caracterización térmica y energética de las HUZ edificatorias (HUZ-Buff), éstas se han combinado con las principales estructuras de clasificación utilizadas para definir el parque edificatorio español, con el fin de catalogarlas constructivamente desde una aproximación *bottom-up*. Como muestran las clasificaciones anteriormente analizadas, se utiliza el año, altura y tipología de la construcción. Además, se incorpora el criterio de localización, como aproximación a la calidad del tipo de promoción (pública o privada). De tal forma, se han utilizado los siguientes criterios:

- Periodos de construcción: De acuerdo con la segmentación realizada por el IDAE y la ERESEE 2020, se han seleccionado los rangos: <1900, 1900-1920, 1920-1940, 1940-1960, 1960-1980, 1980-2006, 2006-2022.
- Altura de la edificación: Se han definido tres clases en función del número de plantas, que se corresponden con edificaciones bajas (<3 plantas), edificaciones de altura media (3-7

plantas) y edificaciones altas (>7 plantas). Este criterio ha sido seleccionado combinando las clasificaciones de IDAE, ERESEE 2020 y la revisión bibliográfica relacionada con las características constructivas de Madrid mostrada en la Tabla 10.

- Tipología edificatoria: En base a la clasificación del IDAE, ERESEE y TABULA, se han diferenciado las tipologías edificatorias colectivas y unifamiliares.
- Localización: En este sentido se han diferenciado las construcciones localizadas en el centro como aquellas delimitadas según el PGOUM 1997 como patrimonio histórico (NZ1) y en la periferia, para el resto de las edificaciones.

La Tabla 11 muestra la combinación de ambas clasificaciones: las tipologías edificatorias HUZs y las clasificaciones de caracterización constructiva para el análisis energético. Para ello, se indica el porcentaje de edificios HUZ dentro de cada clase edificatoria, resaltando, los valores máximos. Con el fin de centrar mejor el análisis, se han eliminado aquellas combinaciones cuyo valor de representatividad es cero en todas las clases HUZ. Además, únicamente se han considerado para este cálculo del porcentaje, aquellos edificios que pertenecen al 100% a la clasificación HUZ (HUZ-BufferOrig). De esta forma, como muestra la Tabla 7, se han identificado para cada tipo de HUZ edificatoria a una clase constructiva, a la que se le asumen técnicas y calidades constructivas similares.

FACTORES DE CLASIFICACIÓN CONSTRUCTIVA				TIPOLOGÍAS EDIFICATORIAS HUZs (HUZ-BufferOrig)											
Periodo Construcción	Localización	Edificación	Altura	HC	HE	CA	DL	DH	SL	SH	SC	DV	DS	TV	TR
<1900	Centro	Colectiva	Media	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1900-1920	Centro	Colectiva	Media	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1900-1920	Periferia	Colectiva	Media	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1920-1940	Centro	Colectiva	Media	19%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1920-1940	Centro	Colectiva	Alta	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1920-1940	Periferia	Colectiva	Media	7%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1940-1960	Centro	Colectiva	Media	10%	45%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1940-1960	Centro	Colectiva	Alta	0%	6%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1940-1960	Periferia	Colectiva	Baja	0%	0%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
1940-1960	Periferia	Colectiva	Media	4%	5%	14%	11%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1940-1960	Periferia	Colectiva	Alta	0%	1%	0%	1%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1940-1960	Periferia	Unifamiliar	Baja	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	49%	0%
1960-1980	Centro	Colectiva	Media	0%	18%	0%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1960-1980	Centro	Colectiva	Alta	0%	5%	0%	1%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1960-1980	Periferia	Colectiva	Baja	0%	0%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
1960-1980	Periferia	Colectiva	Media	0%	8%	59%	67%	0%	75%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1960-1980	Periferia	Colectiva	Alta	0%	1%	0%	11%	85%	6%	67%	0%	0%	0%	0%	0%
1960-1980	Periferia	Unifamiliar	Baja	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	29%	24%	0%
1980-2006	Periferia	Colectiva	Baja	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
1980-2006	Periferia	Colectiva	Media	0%	0%	2%	2%	0%	10%	0%	72%	0%	0%	0%	0%
1980-2006	Periferia	Colectiva	Alta	0%	0%	0%	1%	8%	2%	33%	3%	0%	0%	0%	0%
1980-2006	Periferia	Unifamiliar	Baja	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	69%	24%	86%
2006-2022	Periferia	Colectiva	Media	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%	0%	0%	0%	0%

2006-2022	Periferia	Colectiva	Alta	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%
2006-2022	Periferia	Unifamiliar	Baja	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%
TOTAL, edificios HUZs				2020	510	493	868	581	2481	235	288	20	42	1735	351
Valor máximo identificado.				52%	45%	59%	67%	85%	75%	67%	72%	80%	69%	49%	86%

Tabla 7. Asimilación de las tipologías edificatorias HUZs a las clasificaciones de caracterización edificatoria para el análisis energético.

Finalmente, la Tabla 8 resume las 8 clases constructivas identificadas para cada HUZ edificatoria (HUZ-Cons), destacando que pese a tener características urbanas y edificatorias diferentes, algunas tipologías, sí podrían basarse en técnicas constructivas similares. Este es el caso de las HUZs CA, DL y SL, que pertenecen al mismo tipo constructivo de Clase IV. También la Clase V comparten técnicas constructivas similares para BH y SH, así como la Clase VIII para DS y TR.

Clase constructiva	Periodo construcción	Localización	Edificación	Altura	Edificio HUZ
Clase I	1900-1920	Centro	Colectiva	Media	HC
Clase II	1940-1960	Centro	Colectiva	Media	HE
Clase III	1940-1960	Periferia	Unifamiliar	Baja	TV
Clase IV	1960-1980	Periferia	Colectiva	Media	CA / DL / SL
Clase V	1960-1980	Periferia	Colectiva	Alta	BH / SH
Clase VI	1960-1980	Periferia	Unifamiliar	Baja	DV
Clase VII	1980-2006	Periferia	Colectiva	Media	SC
Clase VIII	1980-2006	Periferia	Unifamiliar	Baja	DS / TR

Tabla 8. Definición de la clase constructiva para cada tipología HUZ desde la aproximación edificatoria.

6.2.3. Localización y selección de edificios representativos HUZs

Este apartado se centra en la identificación de los edificios representativos HUZs y la posterior selección de uno de ellos para cada clase, que se utilizará para la caracterización energética-térmica.

Para identificar los edificios representativos HUZ, se han combinado diferentes enfoques. Los edificios en los que coincida la misma clase HUZ o clase constructiva serán seleccionados como representativos para la caracterización energética *bottom-up*. Para ello se han usado las siguientes perspectivas:

- Enfoque urbano: Utilizando la clasificación HUZ-Pix.
- Enfoque edificatorio: A través de la clasificación HUZ-Buffer.
- Enfoque constructivo: Mediante la clasificación de clases constructivas (HUZ-Cons).

Además, a estos enfoques se añadirá la capa administrativa de barrios, seleccionado únicamente aquellos edificios representativos que se encuentren en los cinco primeros barrios con mayor densidad de edificios de cada clase. De ese máximo de cinco barrios, se ha seleccionado aquel con mayor número de edificios representativos, o aquellos en los que el tejido es más homogéneo después de la inspección visual. La Tabla 9 muestra el solape de estos tres enfoques, así como las zonas donde se encuentran mayoritariamente estos edificios representativos y el barrio seleccionado.

HUZ	CLASE URBANA (HUZ-Pix)	CLASE EDIFICATORIA (HUZ-Buffer)	CLASE CONSTRUCTIVA (HUZ-Cons)	BARRIOS Y EDIFICIOS
				Barrios con mayor densidad de edificios representativos
HC	HC-Pix	HC-Buffer	Clase I (HC-Cons)	Universidad, Embajadores, Justicia, Cortes, Palacio
HE	HE-Pix	HE-Buffer	Clase II (HE-Cons)	Goya, Recoletos , Lista, Arapiles, Arguelles
CA	CA-Pix	CA-Buffer	Clase IV (CA-Cons)	Pueblo Nuevo , San Andrés, Vista Alegre, San Diego, Puerta del Ángel
SC	SC-Pix	SC-Buffer	Clase VII (SC-Cons)	Vicávaro, Valdelasfuentes, Rosas , Casco Vallecas, Los Rosales,
DL	DL-Pix	DL-Buffer	Clase IV (DL-Cons)	Canillejas, Águilas, Aluche , Pueblo Nuevo, Simancas
DH	DH-Pix	DH-Buffer	Clase V (DH-Cons)	Pilar, Guindalera , Peñagrande, Concepción, La Paz
SL	SL-Pix	SL-Buffer	Clase IV (SL-Cons)	Pinar del Rey, Fontarrón, Pueblo Nuevo, Aluche, Arcos, San Cristóbal
SH	SH-Pix	SH-Buffer	Clase V (SH-Cons)	Aluche, Valdelasfuentes, Pilar , Estrella, Arcos
DV	DV-Pix	DV-Buffer	Clase VI (DV-Cons)	Arcos, El Viso , Peñagrande
DS	DS-Pix	DS-Buffer	Clase VIII (DS-Cons)	Piovera, Aravaca, Valdemarín, Mirasierra , El Planío
TV	TV-Pix	TV-Buffer	Clase III (TV-Cons)	Entrevías, El Pardo, San Isidro , Canillas, San Fermín
TR	TR-Pix	TR-Buffer	Clase VIII (TR-Cons)	Mirasierra, Aravaca , Valverde, Valdelasfuentes, Rejas, Timón

Tabla 9. Solape de enfoque urbano, edificatorio y constructivo. Localización de edificios representativos HUZ.

Finalmente, de los edificios seleccionado como representativos, se escoge un para cada clase HUZs, que será el que finalmente se analizará energética y térmicamente. Para esta selección última se han considerado diversos factores que incluyen la inspección visual y la disponibilidad de documentación. Con este propósito, se ha usado en la medida de lo posible la información original de los edificios seleccionados. Dicha información engloba planos de distribución, secciones constructivas, así como memoria de materiales. Las principales fuentes de adquisición de datos han sido la consulta de expedientes en diferentes catálogos relacionados con la ciudad de Madrid, principalmente el Archivo de la Villa, Gerencia de Urbanismo, Empresa Municipal de la Vivienda y el Colegio Oficial de Arquitectos. Además, para aquellos casos en los que no había información suficiente, se ha recurrido a la información bibliográfica de los estudios desarrollados Madrid relacionados con la caracterización energética, detallada en la Tabla 10. En este caso se ha especificado la tipología HUZ a la que pertenece, así como su localización y año de construcción.

TIPOLOGÍA HUZ	UBICACIÓN	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	DOCUMENTO DE CASO DE ESTUDIO
HC	Madrid	1669-1900	De la construcción entramada a la introducción de estructuras metálicas en Madrid [247]
HC	Madrid	S.XVIII-S.XIX	Tipificación de las soluciones constructivas de la edificación doméstica madrileña de los siglos XVIII y XIX [248]
HC	Centro	S.XVIII-S.XIX	Actuaciones con criterios de sostenibilidad en la rehabilitación de viviendas en el centro de Madrid [333]
HC	Palacio	1915	Proyecto de reforma. Arquitectos: Álvaro Alberto Jiménez y Enrique Carrera Salinas. Visado COTAM: TL/015212/2015. Año 2015
HE	C/ Delicias 13	1920	Consulta Archivo de la Villa. Expediente: 24-114-24
HE	C/ Jorge Juan 74	1920	Consulta Archivo de la Villa. Expediente: 42-497-75
HE	C/ Calatrava 18	1940	Consulta Archivo de la Villa. Expediente: 42-497-75
HE	C/ Lista 42	1945	Consulta Archivo de la Villa. Expediente: 44-31-4
SL/DL/SH/DH	Madrid	1939-1979	La envolvente energética de la vivienda social en el caso de Madrid en el periodo 1939-1979 [256]
SL/DL/SH/DH	España	1939-1989	Analysis of thermal insulation in social housing in Spain (1939–1989) and its possible adaptation to the Sustainable Development Goals (SDGs) [255]

HE/CA/SL/DL/SH/DH	España	1940-1980	The evolution of construction systems in building industrialization procedures [257].
SL/DL/SH/DH	España	1945-1975	Housing constructive solutions during Francoism: The case of railway housing [253], [334]
SL	Los Ángeles	1950	Façade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock [334]
CA	C/ Eduardo Marquina 8	1952	Consulta Archivo de la Villa. Expediente: 43-243-33
SL/DL/DH/SH/TV	Cañorroto	1960	La envolvente en la rehabilitación de conjuntos de vivienda protegida [335]
SL/DL	San Cristóbal	1960	On the minimal thermal habitability conditions in low-income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty [173]
SL	C/ Beniferri 24	1960	Consulta Archivo de la Villa. Arquitectos: Eugenio César Estallés et al.
SL	San Cristóbal	1960	Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements [336]
Todos	Madrid	1962	Use of cadastral data to assess urban scale building energy loss. Application to a deprived quarter in Madrid [189]
DL	C/ Godella 215	1963	Consulta Archivo de la Villa. Propietario: NORAH S.A.
SL	San Cristóbal	1965	Two dwellings in San Cristóbal de los Ángeles, Madrid [337]
SL	San Cristóbal	1965	Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements [336]
DH	Madrid	1965	Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock [338]
TV	Fuencarral	1965	Minimal Monitoring of Improvements in Energy Performance after Envelope Renovation in Subsidized Single-Family Housing in Madrid [339]
SL	Pinar del Rey	1966	Procedimiento de análisis y evaluación para la rehabilitación térmica de cerramientos de fachada en edificios residenciales. Caso de estudio en el barrio Pinar del Rey, Madrid [340]
CA	C/Hermanos de Pablo	1967	Consulta Gerencia de Urbanismo. Expediente: 992/056/123048
SL	San Cristóbal	1968	Evaluating rehabilitation of the social housing envelope: Experimental assessment of thermal indoor improvements during actual operating conditions in dry hot climate, a case study [341]
SH	C/ Fermín Caballero 64	1970	Consulta Gerencia de Urbanismo. Arquitecto: Juan Velasco Viejo
DV	C/Pablo Gargallo 30	1973	Consulta Gerencia de Urbanismo. Arquitecto: Enrique Porto Rey
DH	C/ Fermín Caballero 87	1988	Consulta Gerencia de Urbanismo. Arquitecto: J.L. Galán Peña
SC	C/Estocolmo 47	1996	Consulta Gerencia de Urbanismo. Arquitectos: F. Meléndez, A. Díaz
SC	PAU Vallecas.	2000	Assessment of construction costs and energy consumption resulting from house energy ratings in a residential building placed in Madrid: “Precost&e Study” [342]
SC	Anterior a CTE	2000	Construction costs and energy consumptions resulting from energy retrofitting in a residential building in Madrid (Spain) [259]
TR	Madrid	2000	Thermochromic mortar façade coating: impact on the building energy performance [343]
TR	C/Estocolmo 22	2005	Consulta Gerencia de Urbanismo. Arquitecto: Javier Alemany Peña

Tabla 10. Revisión bibliográfica de los casos de estudio para la caracterización energética analizados en Madrid.

Finalmente, la Figura 34 muestra la selección de edificios representativos, detallando el barrio en el que se encuentran y su contexto urbano (cuadrícula de 200 x 200 m²).

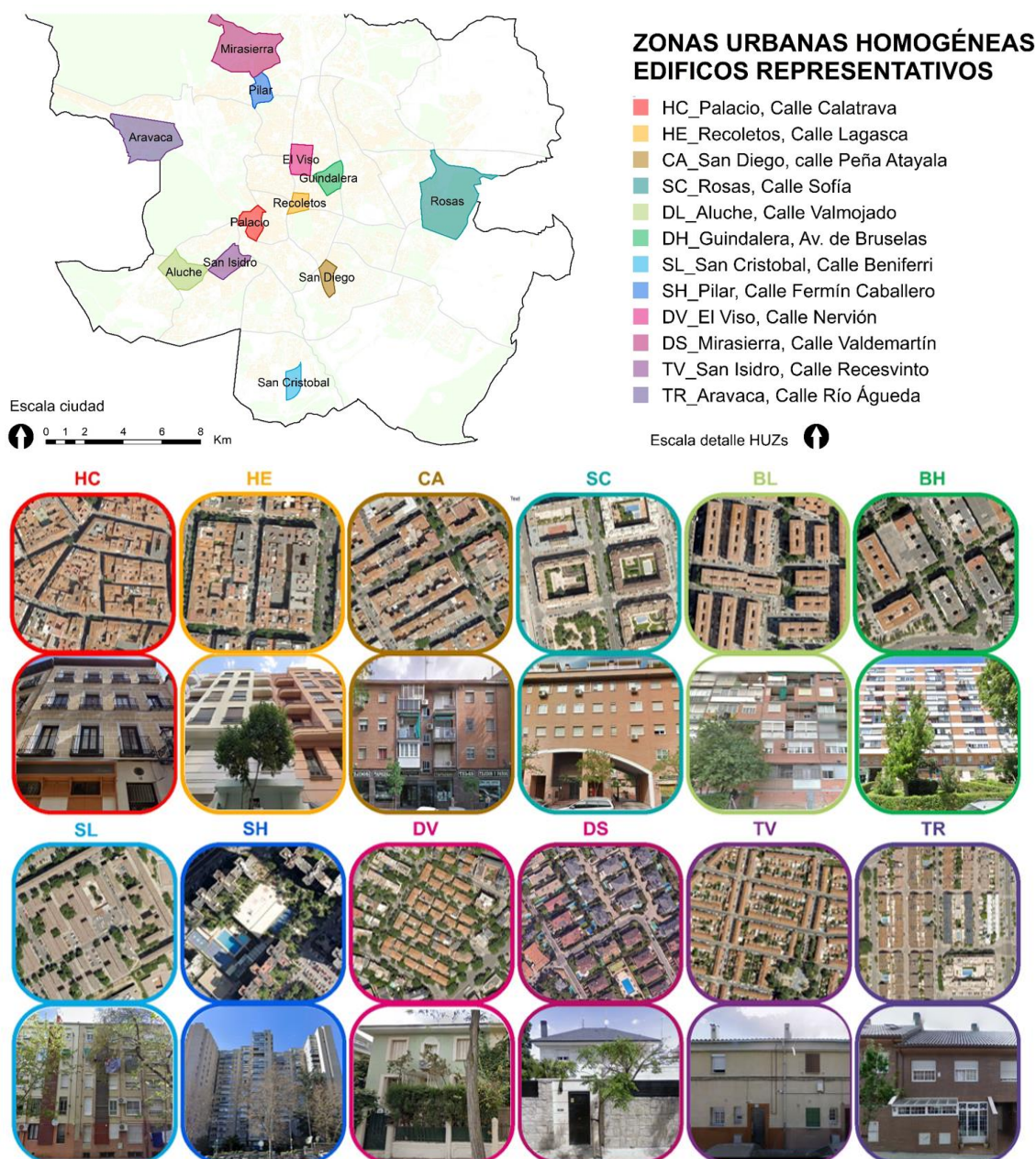


Figura 34. Selección y localización de barrio y contexto urbano de edificios representativos HUZs.

6.3. Caracterización de los edificios representativos de cada HUZ

Para la caracterización energética y térmica de los edificios representativos HUZs, se han definido los factores geométricos, constructivos, y de ocupación identificados anteriormente como como determinantes en la Sección 6.1.

A modo de resumen, la Tabla 11 define y especifica el cálculo de los principales indicadores edificatorios, los cuales se detallan posteriormente.

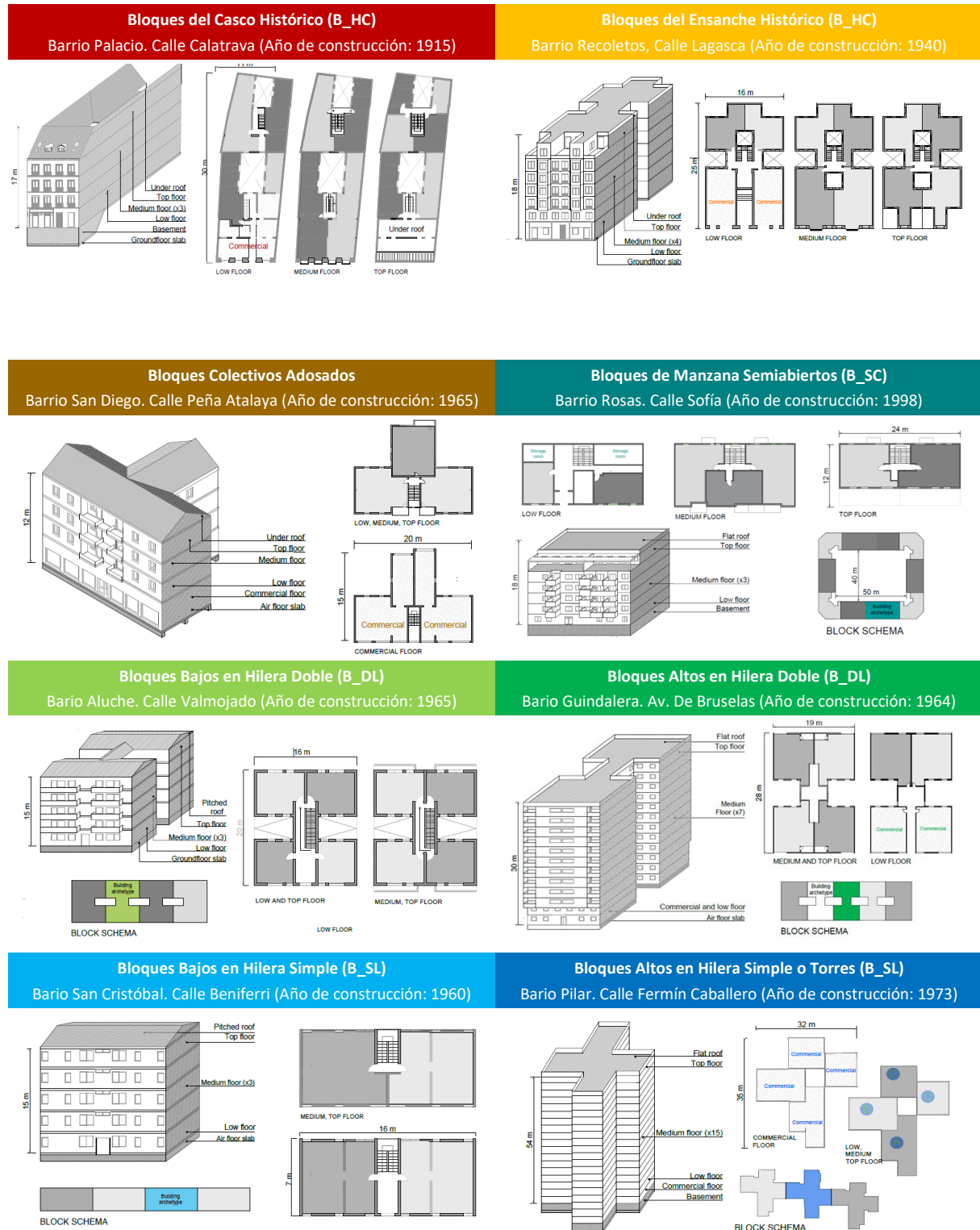
NOMBRE	DEFINICIÓN	FUENTE DE DATOS	
CARATERÍSTICAS GEOMÉTRICAS/USOS			
CONTORNO DE LA SUPERFICIE ContronoSup [m²]	Contorno del edificio dividido en superficie de envolvente y superficie adiabática.	Edificio represen. ii	- Superficie exterior en contacto con zonas habitables (adiabático) - Superficie exterior en contacto con zonas no habitables (envolvente)
SUPERFICIE CONSTRUIDA SupConstr [m²]	Superficie construida según usos	Edificio represen ii Cálculo DGCE iv	Superficie de zona residencial, superficie de zonas de paso comunes, garajes y comercial.
CARATERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS			
TRANSMITANCIA TÉRMICA U [W/m²K]	Cantidad de calor que se transfiere a través de muros, cubiertas, suelos, huecos, particiones interiores, forjados.	Rev. Bibliográfica i Edificio represen. ii	- Año y altura - Tipología edificatoria y localización - Materiales y espesores
RATIO VENTANA-MURO WWR [%]	Relación entre el área de las ventanas y el área total de la pared exterior de un edificio	Rev. Bibliográfica i Edificio represen. ii	- Superficie de muros exteriores - Superficie de ventanas
INFILTRACIÓN Inf [ren./h]	Flujo no controlado de aire exterior que entra en el interior del edificio a través de grietas, aberturas y juntas en la envolvente del edificio	Rev. Bibliográfica i Edificio represen. ii CTE iii	- Nº de viviendas - Ventilación mecánica - Volumen y área de fachadas cubiertas y huecos - Permeabilidad de huecos
COEF. DE GANACIA DE CALOR SOLAR SHGC. [adimensional]	Cantidad de calor solar que ingresa a través del vidrio.	Rev. Bibliográfica i	Especificaciones técnicas
COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS			
CARGAS INTERNAS Cargas [W/m²]	Calor generado dentro del edificio debido a actividades humanas y al uso de equipos	CTE iii	- Ocupación sensible - Ocupación latente - Iluminación - Equipos
PERFILES OCUPACIÓN Perfiles [intensidad/hora]	Presencia de personas y el uso de los espacios: calefacción, refrigeración, iluminación y ventilación.	CTE iii RITE v	- Tipo de uso de estancia - Temperaturas de consigna
VENTILACIÓN Ventilación [ren./h]	Intercambio de aire entre el interior y el exterior. Ventilación forzada y natural (nocturna de verano)	Rev. Bibliográfica i Edificio represen. ii CTE iii	- Nº persona/edificio - Nº de cocinas/baños - Volumen y superficie estancias
i) Revisión bibliográfica; ii) Edificio representativo; iii) Código Técnico de la Edificación; iv) Dirección General del Catastro de España; v) Reglamento de las Instalaciones Térmicas en los Edificios			

Tabla 11. Indicadores edificatorios para la caracterización de edificios representativos HUZs

6.3.1. Características geométricas

Las características geométricas de los edificios seleccionados como representativos HUZs, se han recopilado en diferentes fichas.

Como muestra la Figura 35, éstas indican su volumetría y planta, especificando dimensiones y diferentes usos dentro del edificio. Además, en aquellos casos en los que los edificios estudiados pertenecen a un conjunto de bloques, se esquematiza su composición.



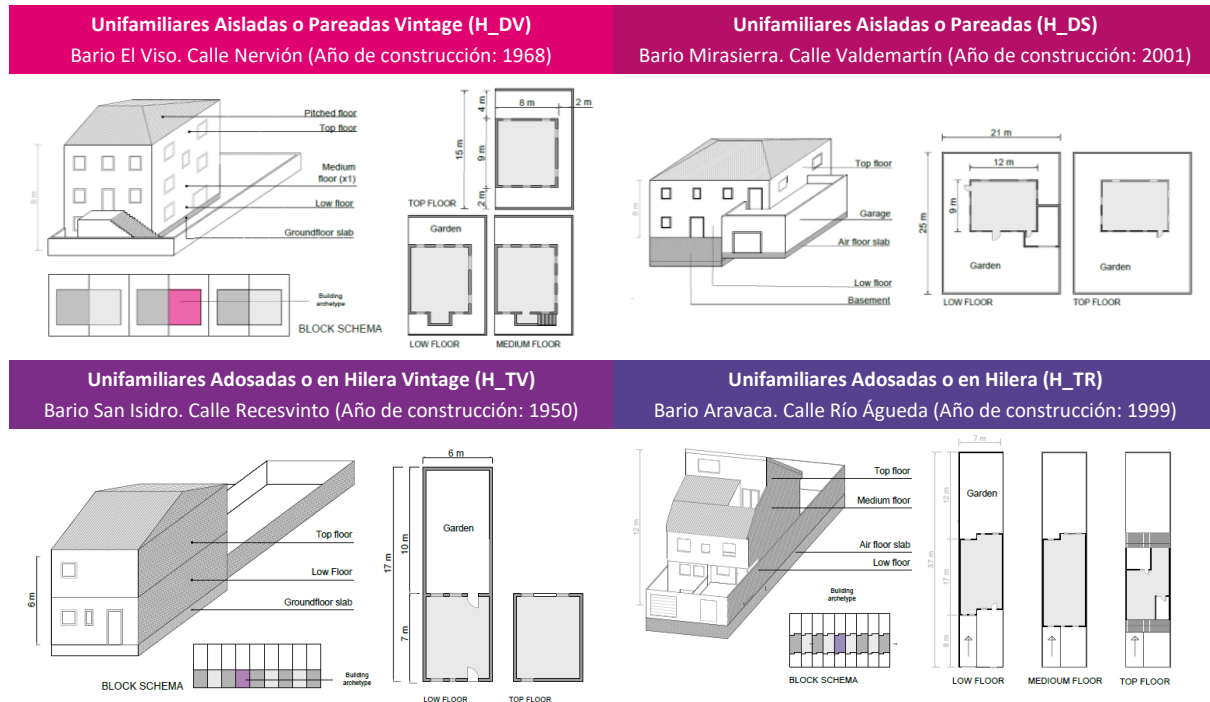


Figura 35. Fichas descriptivas de las características geométricas de los edificios HUZs representativos.

Para facilitar la comparación de los factores de geometría de edificios representativos HUZs, la Tabla 12 y la Figura 36, resumen las propiedades relacionadas con la distribución de espacios dentro del edificio.

Las tipologías HC y HE, ambas localizadas en entramados de manzana cerrada, pese a construirse en décadas diferentes, presentan valores similares en cuanto al número de plantas y viviendas y tamaño de los hogares y distribución de superficies, que destacan por combinar locales comerciales y viviendas en las primeras plantas. Dentro de las viviendas colectivas la tipología CA, también alojada en bloques de manzana cerrado, es la que menor superficie construida tiene, que se refleja en el menor número de viviendas con un total de 9 y 4 plantas, la primera también destinada a comercios. Cabe destacar que estas edificaciones de manzana cerrada cuentan con viviendas interiores, cuya ganancia térmica debido a la radiación solar se podría ver limitada, especialmente en las plantas bajas, existiendo grandes diferencias con las viviendas ubicadas en la fachada. Para este mismo periodo constructivo encontramos los edificios SL, que suelen formar parte de un conjunto de 4 hileras similares de edificación abierta. Esta clase SL presenta, respecto al tipología CA, menores valores de superficie construida para una planta más y un mayor número de viviendas distribuidas en 2 hogares por planta en cada portal. Este hecho se traduce en la desaparición de los locales en plantas bajas y las viviendas más pequeñas de las tipologías analizadas de 48 m².

La ausencia de locales comerciales también ocurre en la tipología DL, que presenta una mayor superficie construida, debido a su doble hilera, que permite alojar 4 viviendas por planta en cada portal. Los bloques abiertos en altura (DH y SH), se presentan valores de superficie construida muy elevados, como consecuencia de una superficie media de vivienda mayor y una gran cantidad de

viviendas debido a su elevada altura. La tipología DH, también construida en hileras, esta vez de 5 bloques, alcanza las 114 viviendas por bloque, mientras que la clase SH, construida ya en la década de los 70, alcanza las 15 alturas, siendo su forma más similar al tipo torre. DH y SH vuelven a incorporar locales comerciales en sus plantas bajas. El edificio de tipología SC, construido a finales de los 90, presenta también valores de superficie construida muy elevados del bloque, pero en una altura y número de viviendas más próximas a la manzana cerrada tradicional. Su superficie destinada a viviendas apenas alcanza el 60%, ya que gran parte de su superficie se destina a garajes, zonas comunes y en menor medida locales comerciales.

Finalmente, las tipologías unifamiliares presentan los menores valores de superficie construida, aunque se caracterizan por tener las dimensiones de vivienda más altas, especialmente las contricciones más recientes (DS y TR). Además, estas viviendas unifamiliares presentan garajes o sótanos en sus plantas bajas, a excepción de la clase TV, que se caracteriza por ser la más antigua y tener dimensiones de vivienda mucho menores.

Para el cálculo de infiltración se ha seguido el procedimiento propuesto por el documento “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios” para el caso de opacos y huecos [344]. Los resultados obtenidos muestran altos valores para las tipologías unifamiliares, por su mayor exposición de fachada. La tipología SL con viviendas pasantes debido a su distribución de dos viviendas por plantas, así como DL y HE, que tienen una mayor superficie de fachadas a patios, también se caracteriza por estas altas tasas de infiltración.

Finalmente, los valores de WWR son muy similares para todas las clases, encontrándonos valores próximos al 20% en las tipologías SC y DH.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y CONSTRUCTIVAS DE LOS EDIFICIOS HUZ REPRESENTATIVOS												
	HC	HE	CA	SC	DL	DH	SL	SH	DV	DS	TV	TR
Año de construcción	1916	1940	1960	1998	1965	1966	1960	1973	1968	2001	1950	1996
Total, viviendas bloque (nº)	22	26	9	16	40	114	20	68	1	1	1	1
Total, plantas por portal (nº)	5	5	4	6	5	10	5	15	3	2	2	3
Superficie media viviendas (m2)	67	55	55	80	51	102	48	129	108	180	77.6	270
Número de viviendas por planta	4-6	4	3	3	4	4	2	4	1	-	-	-
Superficie construida bloque (m2)	1819	2228	766	18574	1824	4902	575	35208	162	290	77.6	270
Infiltración (ren. /hora)	0.07	0.14	0.05	0.08	0.22	0.04	0.26	0.02	0.28	0.21	2.08	0.06
Ratio de huecos WWR (%)	10%	10%	11%	18%	12%	20%	11%	13%	10%	13%	13%	13%

Tabla 12. Tabla resumen de las características geométricas y edificatorias de los edificios representativos HUZs.

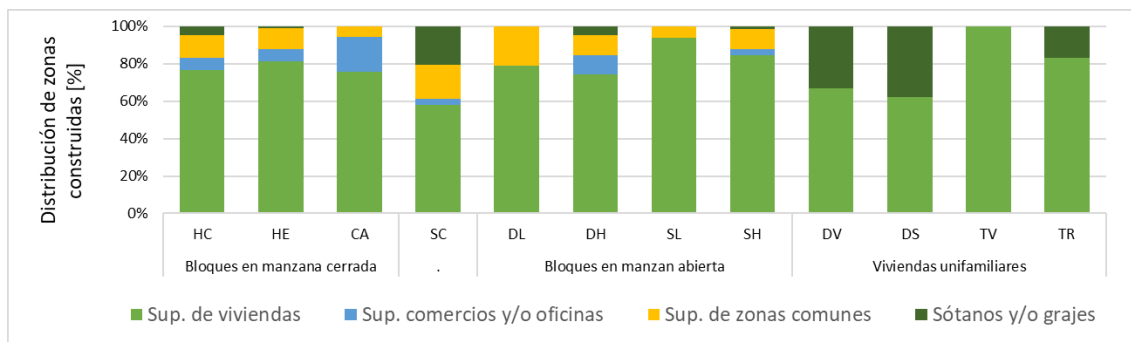


Figura 36. Distribución de las superficies construidas de los edificios representativos HUZs

6.3.2. Características constructivas

Por otro lado, para la caracterización de los edificios representativos se han detallado la composición y materiales de sus sistemas constructivos en base a la revisión bibliográfica e información recopilada en la Tabla 10.

De esta forma, la Tabla 13 detalla la composición de dichos sistemas constructivos, especificado su espesor, transmitancia térmica y exigencias mínimas normativas, en función de la normativa vigente en ese momento. Para al cálculo de la transmitancia térmica de los sistemas constructivos se han utilizado los valores físicos proporcionados en el “Catálogo de elementos constructivos” y el Anexo D del CTE-DB-HE / 1, ambos el facilitados por el CTE [283].

ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS Y SU COMPOSICIÓN DE MATERIALES		ESPESOR [m]	TRANS. TÉRMICA (U) [W/m²K]	LÍMITE NORMATIVO (Ulim) [W/m²K]	
Clase I: Bloques del Casco Histórico (B_HC). Año de construcción 1915				No existe	
Muros de fachada en planta baja / resto de plantas	Enfoscado + fábrica de LM (85 cm / 50 cm)	0,85/0,50	0,83/1,26	-	
Muros medianeros / patios	Enfoscado + entramado madera con relleno de LM y yesones	0,30/0,22*	1,58/1,88*	-	
Cubierta inclinada	Teja cerámica + sobre estructura de madera	0,10	1,68	-	
Suelo terreno	Cama de grava + solera hormigón en masa + plaqueta cerámica	0,39	2,27	-	
Huecos	Marco de madera + vidrio simple 3 mm (U vidrio 5,89 + U marco 3,01 + SHGC 0,861)			-	
Particiones estructurales	Entramado madera con relleno de LM y yesones	0,22	1,88	-	
Particiones no estructurales	Fábrica de LHS	0,08	1,68	-	
Forjados interiores	Plaqueta cerámica + viguetas de madera relleno cerámico aligerante	0,15	1,07	-	
Clase II: Bloques de Ensanche Histórica (B_HE). Año de construcción 1940				Orden 1944	Orden 1955
Muros de fachada	Enfoscado + fábrica de 1 pie LM + CA (2 cms) + LHS	0,34	1,11	-	1,80
Cubierta plana	Baldosa cerámica + tablero cerámico + cámara de aire ventilada + forjado con doble tablero de rasilla	0,48	0,93	-	2,50
Suelo terreno	Cama de grava + solera de hormigón en masa+ plaqueta cerámica	0,44	2,19	-	-
Huecos	Marco de madera + vidrio simple 4 mm (U vidrio 5,81 + U marco 3,38 + SHGC 0,847)			-	-
Particiones estructurales	Fábrica de 1 pie de LM	0,31	1,54	-	-
Particiones no estructurales	Fábrica de ½ pie de LM	0,18	2,04	-	-
Forjados interiores	Parquet + viguetas con tablero de rasilla cerámica	0,15	1,14	-	-
Clase III: Unifamiliares Adosadas o en Hileras Vintage (H_TV). Año de construcción 1950				Orden 1944	Orden 1955

Muros de fachada	Fábrica de ladrillo de 1 pie de LM	0,28	1,79	-	1.80
Cubierta inclinada	Teja cerámica + sobre tablero de rasilla	0,15	1,63	-	2.50
Suelo terreno	Cama de grava + solera hormigón en masa + plaqueta cerámica	0,24	2,13	-	-
Huecos	Marco de madera + vidrio simple 4 mm (U vidrio 5,81 + U marco 3,38, SHGC 0,847)			-	-
Particiones estructurales	Fábrica de 1 pie de LM / Fábrica de ½ pie no estructural	0,28/0,16	2,00/2,41	-	-
Particiones no estructurales	Fábrica de ½ pie de LM	0,16	2,41	-	-
Forjados interiores	Cerámico + viguetas de hormigón con tablero de rasilla cerámica	0,19	1,02	-	-
Clase IV: Bloques Colectivos Adosados, Bajos en Hilera Doble y Simple (B_CA, B_DL, B_SL)				Orden	NNTT
Año de construcción 1965, 1967, 1960				1955	1969
Muros de fachada	Fábrica de ladrillo de 1 pie de LM	0,28	1,79	1,80	1,60
Cubierta inclinada	Teja cerámica + forjado de pares de madera con relleno de tablero de rasilla cerámica	0,15	1,63	2,50	1,80
Suelo terreno	CA (20 cm) + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla	0,40	1,59	-	cámara de aire
Huecos	Marco de aluminio sin RPT+ vidrio simple 4 mm (U vidrio 5,894 + U marco 5,26, SHGC 0,729)			-	-
Particiones estructurales	Fábrica de 1 pie de LM	0,28	2,00	-	-
Particiones no estructurales	Fábrica de LHS	0,08	2,49	-	-
Forjados interiores	Cerámico/hidráulico + viguetas de hormigón con tablero de rasilla cerámica	0,14	1,21	-	-
Clase V: Bloques Altos en Hilera Doble y Simple/ Torres (B_DH, B_SH).				Orden	NNTT
Año de construcción 1965, 1973				1955	1969
Muros de fachada	Fábrica de ladrillo ½ pie LP+ CA (2,5 cms) + trasdosado LHS	0,20	1,32	1,80	1,60
Cubierta plana	Baldosa cerámica + Hormigón áridos ligeros + forjado de HA y bovedilla + falso techo	0,35	1,60	2,50	1,80
Suelo terreno	Cama de grava + CA (20cm) + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla + plaqueta cerámica	0,64	0,59	-	cámara de aire
Huecos	Marco de aluminio sin RPT+ vidrio simple 6 mm (U vidrio 5,778 + U marco 5,88, SHGC 0,62)			-	-
Particiones interiores	Fábrica de LHS	0,08	2,49	-	-
Forjados interiores	Parquet + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla	0,31	1,49	-	-
Clase VI: Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage (H_DV). Año de construcción 1968				Orden	NNTT
				1955	1969
Muros de fachada	Enfoscado + fábrica de 1 pie LM + CA (2 cms) + LHS	0,34	1,11	1,80	1,60
Cubierta inclinada	Teja cerámica + forjado de pares de madera con relleno de tablero de rasilla	0,15	1,63	2,50	1,80
Suelo terreno	Cama de grava + CA (20 cm) + forjado de hormigón con relleno cerámico + plaqueta cerámica	0,40	1,59	-	cámara de aire
Huecos	Marco de madera + vidrio simple 4 mm (U vidrio 5,81 + U marco 3,38 + SHGC 0,847)			-	-
Particiones estructurales	Fábrica de ½ de LM	0,16	2,41	-	-
Particiones no estructurales	Fábrica de LHS	0,08	2,49	-	-
Forjados interiores	Parquet + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla	0,4	0,61	-	-
Clase VII: Bloques de Manzana Semiabiertos (B_SC). Año de construcción 1998				NBE-CT-79	
Muros de fachada	Fábrica ladrillo ½ pie LP + PUR (2 cms) +CA (2 cms) + trasdosado LHS	0,24	0,72	1,4	
Cubierta plana (no transitable)	Grava + AT XPS (3cm) formación pendiente áridos ligeros +forjado de HA + bovedilla cerámica	0,40	0,73	0,9	
Cubierta plana (cubiertas)	Plaqueta cerámica + AT XPS (3 cms) + forjado de hormigón con relleno cerámico	0,40	0,78	0,8	
Suelo terreno	Cama de grava + CA (50cm) + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla + placa gres	0,92	0,28	-	
Huecos	Marco aluminio + vidrio doble 4/6/4 (U vidrio 3,16 + U marco 4,55, SHGC 0,74)			-	
Medianeras	Doble fábrica de LHD doble	0,21	1,46	-	
Particiones interiores	Fábrica de LHD/ Fábrica de LHS	0,12/0,08	2,04 / 2,49	1,6	
Forjados interiores	Parquet + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla	0,29	1,57	-	
Clase VIII: Unifamiliares Aisladas o Pareadas y Adosadas o en Hilera (H_DS, H_TR).				NBE-CT-79	
Año de construcción 2001, 1999					

<i>Muros de fachada</i>	Fábrica ladrillo ½ pie LP+ PUR (2 cms) +CA (2 cms) + trasdosado LHS	0,24	0,72	1,4
<i>Cubierta inclinada (ocupada)</i>	Teja cerámica + forjado inclinado de HA con bovedilla cerámica	0,36	0,78	0,9
<i>Suelo terreno</i>	Cama de grava + CA (50cm) + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla + placa gres	0,92	0,28	0,8
<i>Huecos</i>	Marco aluminio/PVC + vidrio doble 4/6/4 (U vidrio 3,16 + U marco 4,55 + SHGC 0,74)			-
<i>Medianeras</i>	Doble fábrica de LHD doble	0,21	1,46	-
<i>Particiones interiores</i>	Fábrica de LHD/ Fábrica de LHS	0,12/0,08	2,04 / 2,49	1,6
<i>Forjados interiores</i>	Parquet + forjado de hormigón con relleno cerámico de bovedilla	0,29	1,57	-
<i>*Pies derechos cada 60 cms con secciones medias de 16 cms x 16 cms (20 cms x 20 cms en plantas bajas hasta 12 cms x 12 cms en plantas altas).</i>				
<i>AT (aislamiento térmico), CA (Cámara de aire), HA (Hormigón armado), LHD (Ladrillo hueco doble), LHS (ladrillo hueco simple), LM (ladrillo macizo), LP (Ladrillo perforado), PUR (espuma de poliuretano), XPS (poliestireno extruido).</i>				

Tabla 13. Caracterización de las clases constructivas. Sistemas, materiales y propiedades térmicas.

La Figura 37 resume las propiedades relacionadas con la envolvente térmica, definiendo la transmitancia térmica de sus sistemas constructivos y su relación de estos elementos dentro de la envolvente térmica.

Analizando los muros exteriores, cabe mencionar que la clase HC destaca por su alto valor de transmitancia térmica en los muros de los patios de entramados de madera, que se compensa con su bajo valor en los muros de las fachadas formados por 85 cm de ladrillo macizo en planta baja, que se reduce a 50 cm en el resto de las plantas. De la misma forma, los edificios HE y DV se caracterizan por su valor U intermedio, debido a la incorporación de una cámara de aire y trasdosado al sistema de 1 pie de ladrillo macizo. Sin embargo, la eliminación de dicha cámara de aire y trasdosado supone unos aumentos de la hasta los 1,79 W/m²K, obtenido en las clases TV, CA, SL y DL. Las clases DH y SH, vuelven incorporar la cámara de aire y trasdosado, sin embargo, su sistema estructural porticado, permite reducir el espesor del muro exterior, comprometiendo de esta forma la transmitancia térmica de los elementos. Por último, los valores más bajos con 0,72 W/m²K los encontramos en las tipologías SC, DS y TR, que incorporan aislamiento térmico en la cámara de aire e incluyen trasdosado interior (obligatorio en base a las NBE-CT-79).

Las Clases I, III, IV, VI y VIII (HUZ-Cons), destacan por tener cubiertas inclinadas con acabado de teja cerámica, cuya composición varía desde la formación con estructura de madera que alcanza valores máximos de 1,68 W/m²K en HC, el uso de doble tablero de rasilla en CA, DL, SL y la incorporación de aislamiento térmico en DS y TV reduciendo la U con mínimos en SC de 0,73 W/m²K. Cabe destacar que, en la mayoría de los casos, en estas tipologías no existen superficie de envolventes destinada a cubiertas, debido a la cámara de aire que forman los espacios no habitados de las misas, a diferencia de las tipologías unifamiliares más modernas (DS y TV) que cuentan con zonas habitables aboartilladas. Por otro lado, la cubierta plana catalana de HE, que incorpora cámara de aire, implica los menores valores U para su época constructiva, solo superado por aquellos casos en los que se usa aislamiento térmico como es el caso de SC caracterizada por cubierta plana (acabado grava o terrazo). Por el contrario, las clases DH y SH, que se basan en el uso de la lámina impermeable como protección,

combinan cubiertas planas con altos valores de transmitancia térmica, que puede afectar a las condiciones térmicas de las últimas plantas.

Desde el punto de vista de los suelos en contacto con el terreno, destaca los altos valores de HC y HE, que únicamente cuentan una solera de hormigón en masa. Posteriormente, la incorporación de la cámara de aire, que se hace obligatoria en viviendas en contacto con el terreno con las NNTT 1969, reduce su valor hasta valores en torno a los $1,60 \text{ W/m}^2\text{K}$, alcanzando valores mínimos en SC, DS y TV, que combinan un mayor espesor de la cámara de aire y forjado sanitario de mayor espesor. En este caso los locales comerciales, garajes o sótanos en planta baja mejoran limitan la superficie de la envolvente en contacto con el terreno, pudiendo amortiguar las temperaturas interiores de las viviendas en planta baja.

Finalmente, los huecos, son sin duda el elemento constructivo que presenta una mayor limitación térmica. La combinación de vidrios simple con marco de aluminio sin rotura de puente térmico como es el caso de las tipologías CA, SL y DL, suponen valores de huecos de $5,88 \text{ W/m}^2\text{K}$. Estos números disminuyen claramente cuando los marcos son de madera con $3,88 \text{ W/m}^2\text{K}$, como es el caso para HC. Por otro lado, las diferencias notables de transmitancia térmica de los vidrios se alcanzan cuando se incorpora el vidrio doble alcanzando los $3,16 \text{ W/m}^2\text{K}$.

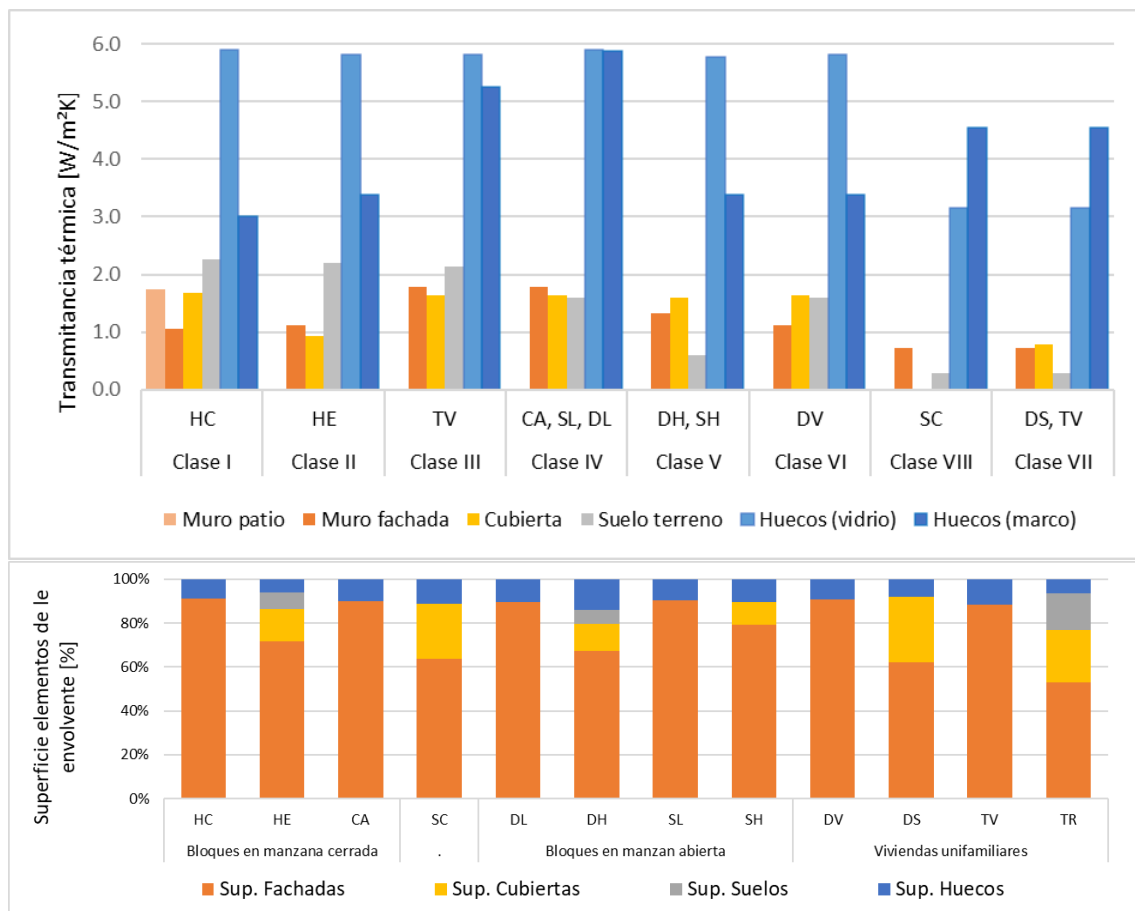


Figura 37. Transmitancia térmica y distribución de los sistemas constructivos de la envolvente térmica para los edificios representativos HUZs.

6.3.3. Perfiles e intensidad de comportamiento de los usuarios

Finalmente, para definir el comportamiento de los usuarios, se ha utilizado los valores sugeridos por el CTE en su DB-HE-Anejo D y el documento “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios” [263], [344]. Pese a que diferentes estudios ponen de manifiesto, las discrepancias entre los valores de ocupación reales y los propuestos por el CTE, se han seleccionado estos valores normativos debido a la falta de modelos y fuentes de datos alternativos validados a nivel estatal que permitan definir con exactitud este comportamiento [345].

Para ello, se han diferenciado los diferentes usos dentro del edificio, especificando zonas comunes, garajes o sótanos, locales comerciales u oficinas y áreas residenciales. A modo de ejemplo la Tabla 14 muestra las condiciones operacionales y perfil de uso para espacios residenciales.

PERFILES DE USO ESPACIOS ACONDICIONADOS RESIDENCIALES PRIVADO	DÍA TIPO	ÁREAS RESIDENCIALES. Perfil horario de una semana tipo					
		00:00-6:59	7:00-14:59	15:00-17:59	18:00-18:59	19:00-22:59	23:00-23:59
Ocupación sensible (W/m ²)	Laboral y sábado	2,15	0,54	1,08	1,08	1,08	2,15
	Festivo	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Ocupación latente (W/m ²)	Laboral y sábado	1,36	0,34	0,68	0,68	0,68	1,36
	Festivo	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Iluminación (W/m ²)	Todos los días	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20
Equipamiento (W/m ²)	Todos los días	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20
Ventilación mecánica (ren. /hora)	Todos los días. Invierno	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	Todos los días. Verano	-	-	0,63	0,63	0,63	0,63
Ventilación natural nocturna de verano (ren. /hora)	Todos los días. Verano	4,00	4,00	-	-	-	-
CONDICIONES OPERACIONALES DE ESPACIOS EN USO RESIDENCIAL PRIVADO	DÍA TIPO	ÁREAS RESIDENCIALES. Perfil horario de una semana tipo					
		00:00-6:59	7:00-14:59	15:00-17:59	18:00-18:59	19:00-22:59	23:00-23:59
Temperatura de consigna alta (°C)	Enero a mayo	-	-	-	-	-	-
	Junio a septiembre	27	-	25	25	25	27
	Junio a septiembre	-	-	-	-	-	-
Temperatura de consigna baja (°C)	Enero a mayo	17	20	20	20	20	17
	Junio a septiembre	-	-	-	-	-	-
	Junio a septiembre	17	20	20	20	20	17

Tabla 14. Condiciones operacionales y perfil de uso para espacios residenciales de uso privado

6.4. Conclusiones

En este capítulo se han seleccionado los edificios representativos de las clases HUZs para el análisis energético y térmico. Las principales conclusiones que se presentan a continuación:

- Se ha mejorado la aproximación metodológica HUZ para la caracterización energética-térmica de las HUZs, mediante el cambio de unidad de análisis. El área del pixel, presentado en la aproximación urbana (HUZ-Pix), se ha cambiado por al área de influencia del edificio (HUZ-Buffer) para la aproximación edificatoria. Para ello se han ajustado los indicadores de clasificación previos tomando como referencia el edificio y se ha repetido el análisis usando los límites fijados previamente en la aproximación urbana. Este hecho ha permitido optimizar la clasificación en zonas donde no existe una homogeneidad clara y se concentran tejidos complejos en un área reducida. Además, una vez caracterizado el entorno urbano, la aproximación edificatoria facilita la cartelización térmica energética *bottom-up*.
- El cambio de HUZ-Pix a HUZ-Buffer pone de manifiesto la importancia de los parámetros escogidos para cuantificar la representatividad urbana-edificatoria. Comparado con la aproximación urbana, en la aproximación edificatoria, prácticamente se ha equiparado la representatividad de HC, CA y SL. Como era de esperar, la representatividad de las viviendas unifamiliares en este caso es mayor, especialmente las de las de hilera vintage (TV), que alcanza en este caso alcanza valores máximos, mientras que las edificaciones semiabiertas (SC), en el caso no tienen tanto protagonismo.
- Se ha evaluado como las clasificaciones constructivas tradicionales, basadas principalmente en el año de construcción, altura y tipologías encajan en la clasificación HUZ. A pesar de añadir como otro indicador relevante la localización de las viviendas, se comprobando que para una misma clase constructiva pueden existir diferencias urbanas y edificatorias claras. Esto es especialmente notorio en la clase constructiva IV, que recoge las edificaciones colectivas de altura media entre los años 1960 y 1980 donde se encuentran tres tipologías HUZs (CA, DL y SL).
- Para la selección de los edificios representativos se han superpuesto las aproximaciones urbanas, pero también las clasificaciones constructivas. De tal forma que se ha considerado que un edificio es representativo cuando pertenece a una misma clase HUZ desde la escala urbana (HUZ-Pix), edificatoria (HUZ-Buffer) y clase constructiva (HUZ-Cons). Además, para acotar la selección, se han escogido aquellos edificios que pertenezcan a un barrio caracterizado principalmente con la clase HUZ que se esté analizando.
- Los edificios seleccionados se han caracterizado energéticamente considerando sus características geométricas definiendo su superficie de envolvente o área adiabática y distribución de espacios (viviendas, zonas comunes, locales comerciales, garajes y sótanos). Desde el punto de vista constructivo, se han definido los materiales y transmitancia térmica de los elementos constructivos, la ratio ventana-muro, el coeficiente de ganancia solar, así como las infiltraciones. Finalmente, se han especificado el comportamiento de los usuarios estableciendo parámetros de cargas internas, perfiles de ocupación, activación de equipos y sus condiciones de puesta en marcha.

- Las principales características de las edificaciones HUZs seleccionadas para para el modelado energético-térmico son:
 - La edificación de caso histórico (HC), es una construcción en manzana cerrada de 5 alturas con gran superficie adiabática, pequeños patios interiores y calles estrechas que limitan el acceso solar. Las plantas bajas combinan locales en la línea de fachada y viviendas interiores. Las plantas altas con cubierta inclinada cuentan con un bajo cubierta. Pese las edificaciones más antiguas cuentan con muros de gran espesor en fachada y entramado de madera que implican transmitancia térmica media, al contrario que sus suelos, que simplemente son una solera en contacto con el terreno. La edificación de Ensanche histórico (HE), morfológicamente es similar a CH, pero con menos superficie adiabática debido a la gran superficie de patios interiores. Consecuentemente, el acceso solar a las viviendas es difícil a excepción de la última planta. Sus muros combinan muros de 1 pie de ladrillo con cámara de aire y en la cubierta plana catalana también encontramos una cara de aire que reduce notablemente su transmitancia térmica ($0,93 \text{ W/m}^2\text{K}$).
 - La tipología de bloques de manzana cerrada (CA) cuenta con las edificaciones colectivas más bajas y menos viviendas, destacando el uso de la totalidad de su planta baja para locales. Los bloques bajos de hilera doble y simple (DL y SL), son edificaciones de tipo abierta de cinco alturas formadas por conjuntos de cuatro portales, sin locales comerciales. Las simples cuentan con dos viviendas pasantes por planta y las dobles con cuatro, generándose en esta última tipología patios interiores. Las clases CA, DL Y SL cuentan con las mismas propiedades constructivas, muros de 1 pie de ladrillo macizo, que supone una alta transmitancia térmica ($1,63 \text{ W/m}^2\text{K}$). Las últimas plantas cuentan con un bajo cubierta, debido a las cubiertas son inclinadas de tablero cerámico.
 - La clase de bloques altos de hilera doble y simples (DH), son similares a las tipologías DL Y SL, pero con mayor altura. Además, la tipología SH también engloba los conjuntos tipo torre. Sus muros son de $\frac{1}{2}$ pie de ladrillo con cámara de aire y trasdosado ($1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$), mientras que las cubiertas son planas y están directamente en contacto con las plantas superiores. Los suelos incorporan forjados sanitarios, aunque esto no afecta directamente a las plantas bajas, donde existen locales comerciales.
 - El bloque semiabierto (SC) ocupa la totalidad la manzana con un gran patio interior. Los portales cuentan con edificios de 5 alturas y tres viviendas por planta. Las plantas bajas combinan viviendas con locales comerciales, debajo de las cuales se encuentra el garaje. Las plantas altas son tipo ático. Los muros de fachada son de $\frac{1}{2}$ de ladrillo, cámara de aire y trasdosado, incorporando aislamiento térmico, que reduce notablemente la transmitancia térmica ($0,72 \text{ W/m}^2\text{K}$). Las cubiertas son planas y también incorporan aislamiento térmico, que implica valores de transmitancia térmica similares a los muros. En este caso los huecos cuentan con perfiles con rotura de puente térmico y doble vidrio.

- La vivienda unifamiliar en hilera vintage (TV), es de pequeñas dimensiones, dos plantas y gran superficie adiabática en fachada y bajo cubierta. Cuenta con características constructivas similares a CA, DL y SL. Por el contrario, la tipología DV es adosada con tres plantas menor superficies adiabáticas en fachada, pero cuenta con bajo cubierta y sótano. Su calidad constructiva es similar a HE. Las viviendas unifamiliares más modernas son aisladas y en hilera (DS y TR), ambas con grandes dimensiones, con garaje y última planta es abuhardillada. La clase TR cuenta con una alta superficie adiabática, al contrario que para DS. Ambas cuentan con aislamiento en su envolvente, similar a la clase SC.

7. Comportamiento energético-térmico de las viviendas HUZs

Este capítulo se centra en la evaluación energética y térmica de los edificios HUZs.

En concreto ahonda en la simulación de las demandas energéticas y estrés térmico de sus viviendas, promediando los valores a nivel edificio y desagregando esa información por plantas. Esta información se pretende obtener para el caso base actual con el clima TMY y para los escenarios futuros SSP2 en el año 2050 y 2080. Finalmente, se busca conocer cuáles son las diferencias respecto a los otros climas actuales MET e IWECC.

Para ello, los objetivos que plantea este capítulo son:

- i) Definir unos arquetipos optimizados para la evaluación energética-térmica de las edificaciones representativas HUZs que incluyen sus características geométricas, constructivas y ocupación. En este objetivo también se incluye la definición de los parámetros para el cálculo de la demanda y el estrés térmico, así como una verificación de los modelos (Sección 7.1).
- ii) Extraer los valores de demanda de calefacción y refrigeración para las viviendas HUZs para el clima actual TMY y sus proyecciones futuras, así como la comparación con los climas MET e IWECC. Esta información se pretende conocer a nivel edificio y detalladamente por plantas (Sección 7.2).
- iii) Conocer las situaciones de estrés térmico para las viviendas HUZs para el clima actual TMY y sus proyecciones futuras, así como la comparación con los climas MET e IWECC. Esta información se pretende conocer a nivel edificio y para los casos más singulares por planta y de forma horaria (Sección 7.3).

7.1. Modelado energético edificatorio

Con el fin de entender las condiciones de demanda energética y calidad térmica en el interior de las viviendas para cada uno de los edificios HUZs, se han llevado a cabo diferentes simulaciones considerando el clima actual y sus futuras proyecciones, previamente analizadas en la Sección 4.2.

Para la simulación energética se ha utilizado la herramienta de simulación con software comercial Design Builder, una herramienta de simulación de edificios completa que emplea un modelo de energía dinámico basado en el motor EnergyPlus desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos [346], [347]. Esta herramienta de modelado energético de edificios (BEM) resuelve las ecuaciones de transferencia de calor y masa que describen el rendimiento energético de estos arquetipos de edificios, considerando sus superficies, espacios, zonas y envolventes, con una resolución temporal de 1 hora.

7.1.1. Modelización de las viviendas

En esta sección se describen los datos de entrada para el modelado energético, ajustándose a cada uno de los edificios HUZs de estudio.

Escenarios climáticos:

Para considerar el escenario actual se ha considerado el clima experimental actualizado TMY y se ha comparado con los otros climas comúnmente utilizados en España, MET e IWE. Por otro lado, dentro de los escenarios futuros se ha evaluado la situación de las viviendas considerando el escenario SSP2 para los años 2050 y 2080 (SSP250 y SSP280 respectivamente). Este escenario SSP2 corresponde a una situación relativamente continuista, en el que se están haciendo esfuerzos relacionados con la adaptación y mitigación climática en aspectos sociales económicos y tecnológicos, pero todavía no se muestran patrones de cambio muy diferenciados. Puesto que no hay un estudio claro que permita definir el escenario SSP en el que se encuentra la ciudad de Madrid o España, esta trayectoria se fundamenta en el diagnóstico del seguimiento de las estrategias que ofrece el ERSEE 2020 y el PNIEC, en el que se destacan los esfuerzos para alcanzar la neutralidad climática, pero la baja tasa de renovación actual y el esfuerzo por seguir cumpliendo estos objetivos [8], [127].

Modelado geométrico de las viviendas, edificio y su entorno:

Los edificios HUZs se han modelado en base a las fichas presentadas en la Sección 6.3.1., que detallan las características geométricas.

Para ello, se ha considerado el edificio en sí mismo y su entorno, reproduciendo el bloque de manzana urbano de las HUZs. En este sentido se han modelado los edificios circundantes que recrean las sombras y acceso solar de las viviendas y los edificios colindantes medianeros, que además generan superficies adiabáticas. Para facilitar la comparación, se ha considerado en todos los casos la orientación norte-sur.

Además, con el fin de conocer específicamente el estado de los hogares de cada tipología HUZ se han seleccionado las viviendas más representativas desde el punto de vista de la exposición. Para ello se han desagregado por planta baja (PB), planta media (PM) y planta última (PU), así como por localización dentro de la planta (viviendas en esquina y en contacto con otras viviendas, viviendas en fachada y viviendas interiores). Además, se ha supuesto que estas viviendas vecinas no están climatizadas, con el propósito de estudiar las viviendas sin depender de las condiciones de climatización de sus vecinos [173].

Características de cerramientos y parámetros ocupacionales

A través del “Catálogo de elementos constructivos del CTE” [348], se ha generado una base de datos de materiales dentro de la herramienta Design Builder, que posteriormente se han asignado a cada uno de los edificios siguiendo las propiedades de los elementos constructivos descritos en la Tabla 13, de la Sección 6.3.2. También, se han tenido en cuenta los valores de infiltración siguiendo los parámetros descritos en la Tabla 12 de la Sección 6.3.1.

Para cada vivienda se ha considerado una zona de análisis diferente, lo que permite estudiar en detalle su comportamiento individualmente. Siguiendo este concepto, se han especificado diferentes zonas para locales comerciales y/o oficinas, garajes y/o sótanos, las zonas comunes de cada planta de estudio, así como zonas no acondicionadas en los bajo cubiertas y espacios generados por los forjados sanitarios. Los perfiles de uso, así como las condiciones operacionales de los espacios se han utilizado los datos descritos en la Tabla 14, de la Sección 6.3.3 definido en el Anejo D del CTE_DB_HE para el caso de zonas residenciales de uso privado. Para las zonas no residenciales se ha seguido los valores del documento “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios” [263], [344].

7.1.2. Parámetros de estudio.

Una vez definidos los modelos, se han realizado diferentes simulaciones con el objetivo de conocer las demandas energéticas y las situaciones fuera de confort de las viviendas analizadas. Para ello, el estudio se ha dividido en una parte centrada en analizar la demanda energética, mientras que la segunda parte evalúa la temperatura interior y estrés térmico de los hogares.

Para la simulación de la demanda energética se ha considerado que los equipos de climatización se activan cuando se superan las temperaturas de 17-20°C en invierno y 27-25°C en verano (Tabla 15).

En línea con la necesidad de evaluar métricas más allá de la cuantificación energética y la reducción de GEI, cruciales en poblaciones vulnerables económicamente, se han considerado en el análisis la cuantificación de la temperatura interior y el porcentaje de horas e intensidad del estrés térmico.

Para la simulación de la temperatura interior, las viviendas se han estudiado en evolución libre, es decir, sin considerar el encendido de los equipos de climatización una vez superadas las temperaturas máximas y mínimas fijadas en invierno y verano. El objetivo, en este caso, es doble. Por un lado, se pretende ver cuáles son las condiciones de los hogares en aquellos casos en los que no se pudo afrontar o acceder a los sistemas calefacción y refrigeración, así como conocer las condiciones de partida para enfocar las futuras estrategias de rehabilitación energética. Para este caso, se ha considerado para el análisis la temperatura interior del aire.

Finalmente, el estudio de la habitabilidad térmica de las viviendas se ha evaluado con la metodología de confort térmico adaptativo considerando la temperatura interior operativa. La selección de la evaluación del confort adaptativo se justifica por ser potencialmente más eficiente en términos de ahorro energético, ya que los usuarios pueden interactuar para minimizar el malestar [349], [350]. Entre ellas, la norma EN 16798 (anterior EN 15251), incluida en el procedimiento EPBD y basada en el Comité Europeo de Normalización, se recomienda en los países europeos [351]. A nivel español, el RITE o la ERESEE 2020, también hacen referencia a la EN 16798 [104], [127].

La EN 16798 establece una temperatura óptima de confort (T_{op}), limitada entre 10°C y 30°C para su valor mínimo y máximo respectivamente. El cálculo de esta T_{op} , se muestra en la Ecuación 4:

$$T_{op} = (0,33\theta_{mr}) + 18,8 \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde Θ_{mr} es la temperatura media externa móvil del día de análisis, escogiéndose para este caso una Θ_{mr} en base a los 5 días previos. Como muestra la Tabla 15, la norma establece unos límites de aceptabilidad a partir de la Top para diferentes necesidades habitacionales. La categoría I establece unos criterios altos de expectativa, aplicable a ocupantes con necesidades especiales (niños, personas mayores, personas con discapacidades, etc.). Por el contrario, la Categoría III, disminuye los límites de confort al máximo [352]. Finalmente, la categoría II, ha sido seleccionada para este estudio, por establecer unos valores de confort normales. Para ello, los valores límites establecidos por la norma, se han comparado con la temperatura operativa en el interior de las viviendas.

Categoría	Nivel de expectativa	Límite superior	Límite inferior
Categoría I	Alto nivel de expectativa	$Top +2.0$	$Top -3.0$
Categoría II	Nivel de expectativa normal	$Top +3.0$	$Top -4.0$
Categoría III	Nivel de expectativa aceptable o moderado.	$Top +4.0$	$Top -5.0$

Tabla 15. Cálculo de las temperaturas umbrales de confort interior para las diferentes categorías de nivel de expectativa según la norma EN 16798

7.1.3. Contraste del modelo

Este apartado se centra en evaluar la concordancia de los valores del modelo de simulación con valores reales medidos in-situ en diferentes viviendas. En este sentido se ha llevado a cabo una campaña de monitorización durante el verano del 2024.

Para ello se han instalado sensores inalámbricos tipo HOBO que han registrado cada 10 minutos las condiciones de temperatura y humedad de las viviendas. Los hogares escogidos se han seleccionado procurando, en la medida de lo posible, simular las condiciones de los edificios simulados. En línea con esta idea, se han elaborado una serie de formularios, recogiendo las características de las viviendas y condiciones de los ocupantes. De los formularios realizados, se han seleccionado para el análisis aquellas viviendas que cumplen los siguientes factores:

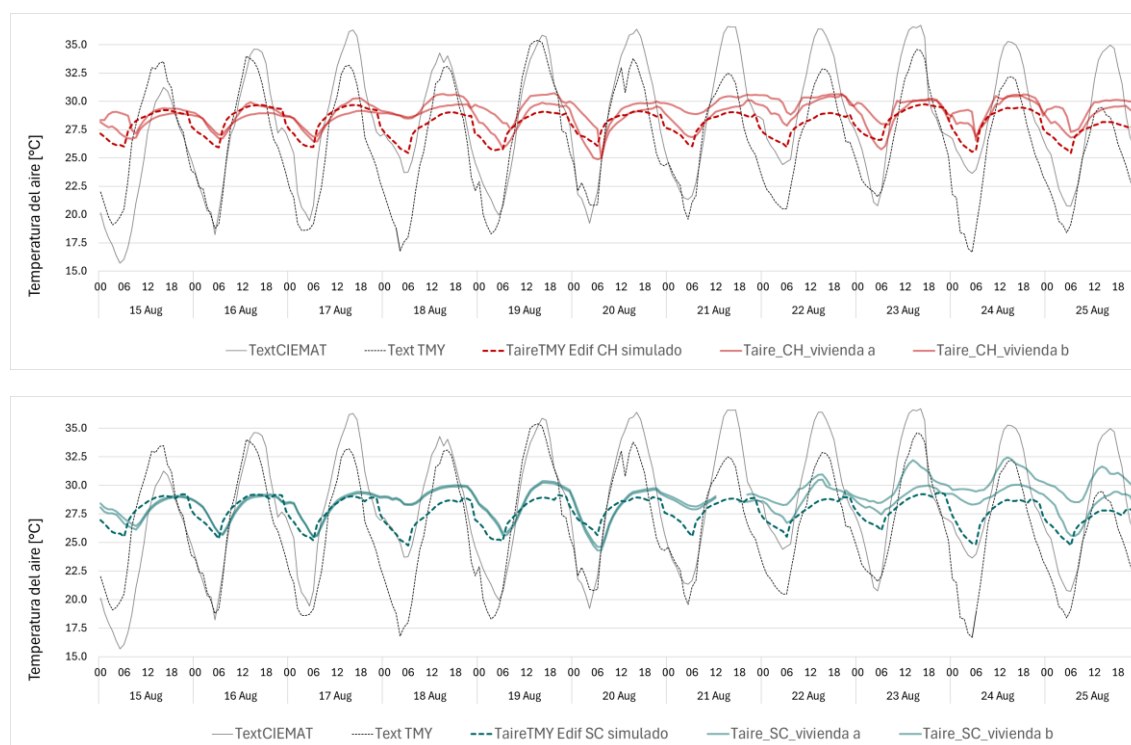
- Que las viviendas clasifiquen desde la perspectiva urbana, edificatoria y constructiva con la misma clase HUZ (HUZ-Pix, HUZ-Buff y HUZ-Cons) y que muestren un grado de representatividad elevado dentro de la ciudad.
- Evitar hogares que hayan hecho reformas importantes que puedan modificar las condiciones originales del edificio, tales como incorporación de aislamiento térmico o cambio de ventanas.
- Seleccionar plantas medias, que estarían más en línea con los valores promedio del edificio.
- Desestimar aquellos periodos en los que las viviendas han estado vacías o han usado sistemas como aire acondicionado o ventiladores que pueden variar las condiciones interiores.

Tenido en cuenta estos factores, las tipologías escogidas han sido HC, SC y SL y el periodo en el que se ha centrado el análisis ha sido del 15 al 25 de agosto del 2024. Los sensores se han ubicado en la estancia principal, tratando de buscar la misma orientación que el modelo.

Una vez finalizada la campaña experimental, los valores registrados se han procesado, eliminando valores atípicos (valores superiores a 1,5 veces el rango Inter cuartil) y definido valores medios horarios.

De esta forma, la Figura 38 muestra la comparación de temperaturas horarias simuladas (líneas de puntos) y monitorizadas (línea sólida) para las tipologías representativas HUZs HC, SC y SL. Además, la Tabla 16, resume los valores medios, mínimos y máximos de temperatura del aire exterior e interior de las viviendas para los casos simulados y monitorizados en el periodo de análisis.

De forma generalizada se puede observar que el comportamiento de los valores registrados sigue un comportamiento similar al presentado por el simulado. Cabe destacar pequeñas diferencias, que en cualquier caso no llegan a superar un grado de media (0,9; 0,9 y 0,8 para HC, SC y SL respectivamente). Estas variaciones se encuentran especialmente en los casos en los que la temperatura exterior difiere notablemente del clima TMY. Esto ocurre principalmente en las horas nocturnas, que además de no poder disminuir la temperatura interior por las altas temperaturas exteriores, se suman factores asociados al comportamiento de los usuarios. Un claro ejemplo sería la limitación de la ventilación nocturna, debido a ruidos, iluminación exterior, entre otros, lo que limita la efectividad de este parámetro normativo. Este comportamiento del usuario también puede diferir de los valores fijados por el CTE en cuanto a perfiles e intensidades, difíciles de cuantificar y que se encuentran fuera del objetivo de este trabajo.



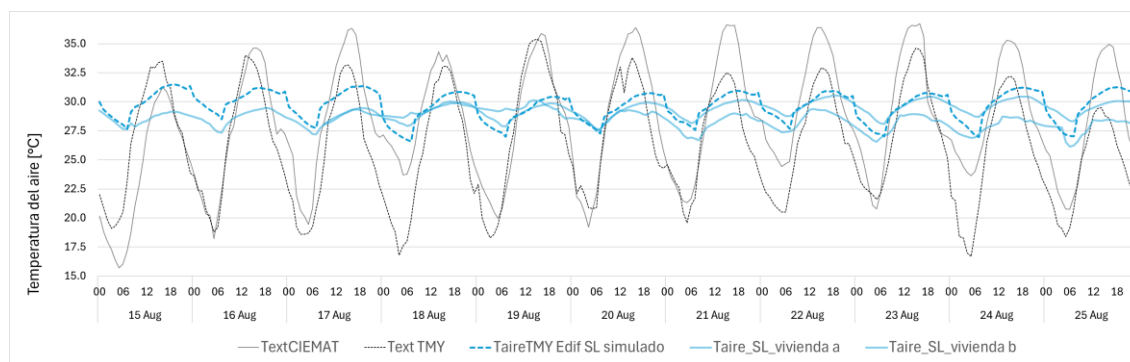


Figura 38. Comparación de temperaturas horarias simuladas (líneas de puntos) y monitorizadas (línea sólida) para las tipologías representativas HUZs HC, SC y SL.

Parámetro de análisis	Temperatura aire exterior		Temperatura del aire interior viviendas								
	Estación CIEMAT	Valor clima TMY	Sim. HC	Moni. HC a	Moni. HC b	Sim. SC	Moni. SCa	Moni. SCb	Simu. SL	Moni. SLa	Moni. SLb
Valor medio	28,15	26,28	28,05	29,34	28,63	27,68	28,91	28,51	29,66	28,47	29,18
Valor máximo	36,72	35,40	29,74	30,73	30,61	29,34	32,46	30,50	31,51	30,13	30,56
Valor mínimo	15,70	16,70	25,45	25,04	24,88	24,74	24,29	24,59	26,59	26,14	27,19

*Sim. Se refiere a valor simulado. Moni. Se refiere a valor monitorizado.

Tabla 16. Valores medios, mínimos y máximos de temperatura del aire exterior e interior de las viviendas para los casos simulados y monitorizados en el periodo de análisis (15-25 de agosto 2024).

Finalmente, con el fin de cuantificar las desviaciones máximas admisibles, se han aplicado diferentes conceptos estadísticos relacionados con el cálculo de errores entre los datos monitorizados y simulados. Para este fin se han utilizado los valores límites fijados para el tratamiento de datos horarios por diferentes estándares. En concreto, ASHRAE fija en su Guía 14-2014 rangos máximos para el porcentaje del error medio de sesgo normalizado (NMBE) y el coeficiente raíz del error medio cuadrático (CV(RMSE)) de $\pm 10\%$ y $\pm 30\%$ respectivamente [353]. La norma alemana VDI-6020:2002 establece un valor máximo para el error medio cuadrático (RMSE) de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el estándar CISBE, de Reino Unido, en la TM-63, limita la media absoluta del error (MAE) a un máximo de $2,0^{\circ}\text{C}$ [354], [355].

La Tabla 17, muestra los valores obtenidos para los errores mencionados anteriormente, comprobando que para todos los casos están dentro de los umbrales fijados.

Análisis del error para datos horarios	Límites estándares	Moni. CHa	Moni. CHb	Moni. SCa	Moni. SCb	Moni. SLa	Moni. SLb
Error medio cuadrático: (RMSE)	$\leq 1,5^{\circ}\text{C}$	1,35	0,51	1,32	0,54	1,25	0,31
Porcentaje del error medio de sesgo normalizado (NMBE)	$\pm 10\%$	4,4%	2,0%	3,1%	1,7%	3,9%	-1,7%
Coeficiente raíz del error medio cuadrático: (CV(RMSE))	$\pm 30\%$	4,6%	1,8%	4,6%	1,9%	4,4%	1,1%
Media absoluta del error (MAE)	$\leq 2,0^{\circ}\text{C}$	1,41	0,95	1,39	0,94	1,40	0,86

*Sim. Se refiere a valor simulado. Moni. Se refiere a valor monitorizado.

Tabla 17. Valores límites de error y su cálculo para las viviendas monitorizadas en el periodo de análisis (15-25 de agosto 2024).

7.2. Demanda energética edificatoria de las viviendas HUZs

Este apartado muestra el estudio de la demanda energética de los edificios representativos HUZs para los diferentes climas estudiados, presentando los datos, en un primer estudio, a nivel de edificio. Posteriormente, se ha desagregado esta información a nivel de plantas, comparándolo esta vez el clima actual TMY con el escenario SSP2 para el año 2050 y 2080. En ambos casos se muestran los resultados únicamente de las viviendas, no incluyendo otras zonas no residenciales como locales comerciales, zonas comunes o sótanos y garajes. Además, los valores obtenidos se han ponderado en función del tamaño y número de viviendas del edificio, considerado el conjunto de portales completos que forman el bloque de edificios en el caso de edificaciones en hilera.

7.2.1. Comportamiento energético para los diferentes escenarios climáticos

Para este análisis se han desagregado los datos en viviendas colectivas y unifamiliares, con el fin de poder entender mejor la situación del parque edificatorio madrileño y definir estrategias ajustadas.

La Figura 39 muestra los resultados de la demanda energética edificatoria para las viviendas colectivas de los edificios representativos HUZs a nivel edificio para los climas actuales MET, IWEK y TMY, así como los escenarios futuros SSP2, para los años 2050 y 2080. Las barras de color azul muestran las demandas de calefacción, mientras que en rojo se representan las demandas de refrigeración. Asimismo, se ha resaltado las cifras presentadas para el clima TMY, considerado como caso base. Este escenario se ha considerado como base de comparación por tratarse de un clima actualizado que considera las tendencias climáticas actuales en un entorno urbano.

Para el caso base TMY, en la mayoría de las tipologías se observan demandas de calefacción similares, a excepción de la tipología SC, que es la única que incorpora aislamiento térmico, alcanzando valores medios para todos los casos de 72 kWh/m². Las demandas de refrigeración se reducen en aproximadamente un 30% con cifras medias de 21 kWh/m².

Si analizamos el clima normativo MET, proporcionado por el CTE para la certificación energética de los edificios, se observa que estos valores son muy superiores. De la misma forma, en el clima IWEK, ampliamente utilizado por los programas de simulación energética, encontramos grandes diferencias. Comparado con el clima TMY, los valores de calefacción son aproximadamente un 70% y un 50% más, con cifras medias de 125 kWh/m² y 105 kWh/m² para el caso MET e IWEK respectivamente. Por otro lado, las demandas de refrigeración son claramente inferiores, en torno a la mitad y con valores medios de 12 y 13 kWh/m² para el caso del TMY e IWEK respectivamente.

Analizando los climas futuros, observamos también grandes diferencias respecto al TMY. Las demandas de calefacción van disminuyendo mientras que van aumentando las demandas de refrigeración, de forma que la ratio calefacción- refrigeración disminuye hasta el 20% en el año 2050 y en el año 2080 llegan incluso a ser mayores las necesidades de refrigeración respecto a las de calefacción. Comparando estos números con el clima base TMY las cifras de calefacción son un 20% y un 30% menos, con valores medios de 54 y 47 kWh/m² para SSP250 y SSP280 respectivamente. Por

otro lado, las necesidades de refrigeración aumentan hasta los 43 kWh/m² en 2050, el doble respecto al TMY y llegando a ser dos veces y media más en el año 2080 con un valor promedio de 52 kWh/m².

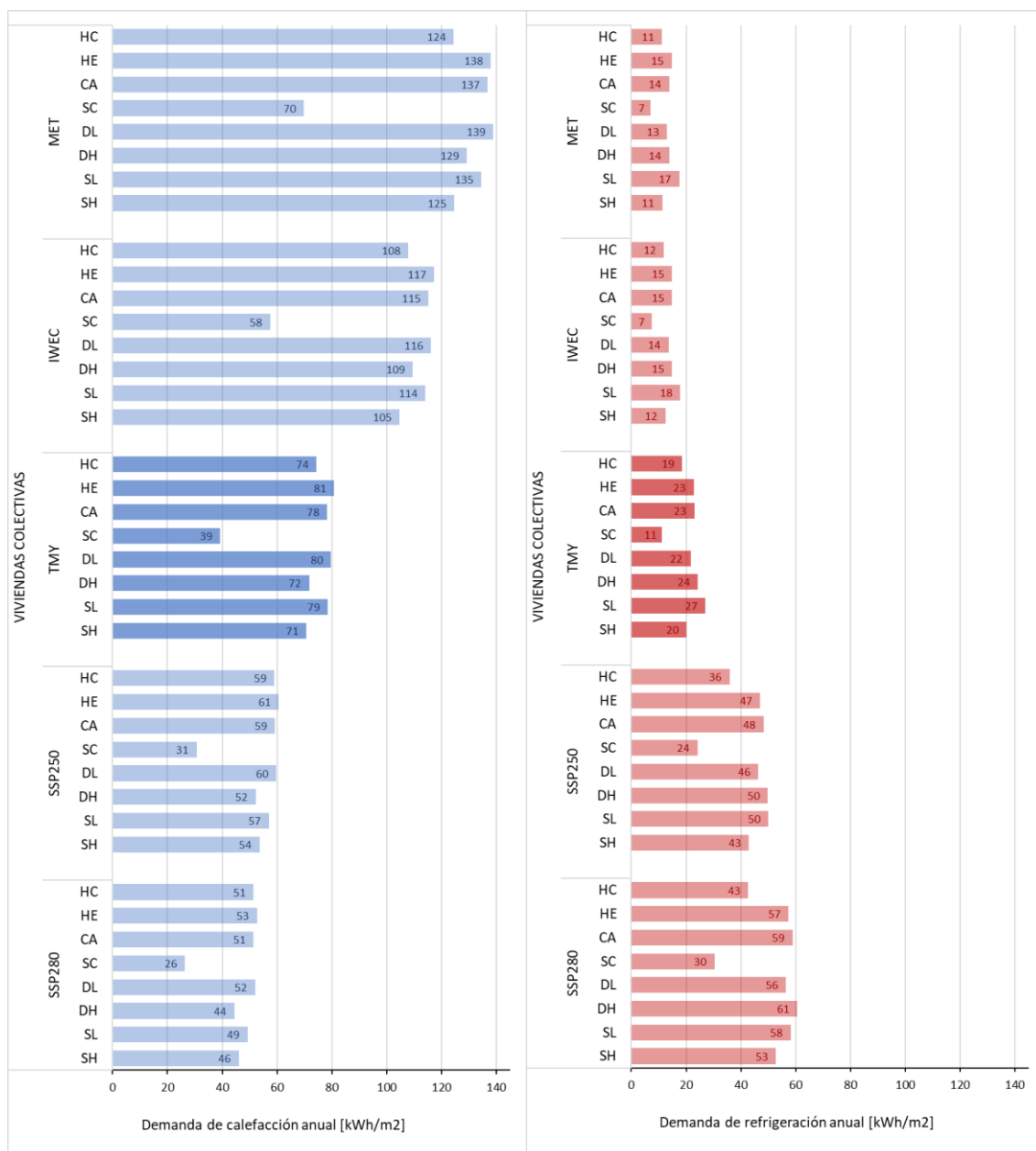


Figura 39. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) a nivel edificio para las viviendas colectivas representativas HUZs. Comparación de los climas actuales MET, IWE y TMY y proyecciones SSP2 en 2050 y 2080

Siguiendo la estructura planteada anteriormente, la Figura 40 representa el comportamiento energético de las viviendas unifamiliares. En este caso, los valores de calefacción y refrigeración están en torno al 55 y 15 kWh/m² respectivamente. Comparado con las viviendas colectivas, las viviendas unifamiliares presentan valores de calefacción y refrigeración menores, debido a la combinación de varios factores. Por un lado, una mejor calidad de los elementos constructivos, especialmente para el caso de las tipologías DS y TR, que incorporan aislamiento térmico y la tipología DV que cuenta con

muros 1 pie y trasdosado con cámara de aire. Por otro lado, el contacto con la superficie exterior de fachada se ve reducido en las tipologías en hilera y pareada (DV, TV y TR), mientras que el contacto con el terreno y cubierta también es menor, por incluir sótanos y/o garajes (DV, DS y TR) y bajo cubiertas (DV y TV).

Por otro lado, si analizamos los diferentes climas, observamos para los climas MET y TMY proporciones de aumentos de demanda de calefacción y disminución de refrigeración muy similares al caso de las viviendas colectivas, alcanzando de media los 33 y 36 kWh/m² de demanda de calefacción y refrigeración respectivamente en la proyección 2080.

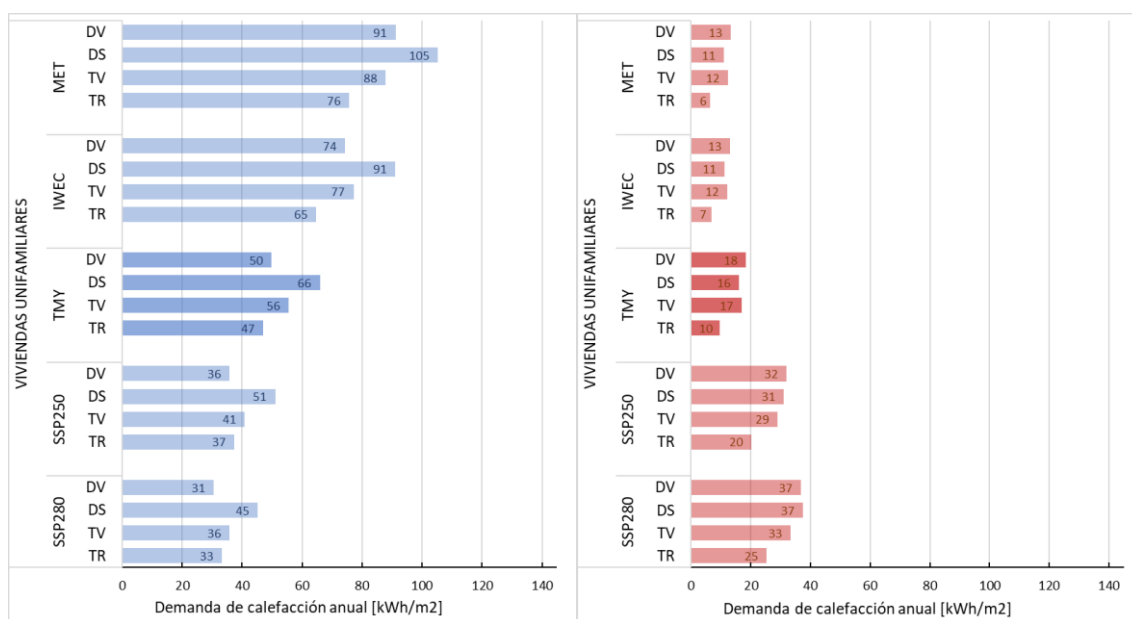


Figura 40. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) a nivel edificio para las viviendas unifamiliares representativas HUZs. Comparación de los climas actuales MET, IWEC y TMY y proyecciones SSP2 en 2050 y 2080

7.2.2. Detalle del comportamiento energético a nivel edificio y por plantas

Si estudiamos en detalle el comportamiento de las tipologías HUZs encontramos diferencias significativas como consecuencia de sus sistemas constructivos y la geometría de sus plantas. La Figura 41 muestra de forma detallada estas variaciones considerando el clima actual TMY para las viviendas colectivas tanto a nivel edificio como en el estudio detallado por plantas.

En la evaluación de los valores a nivel edificio, la tipología de bloque semi abierto (SC) presenta las mejores cifras, con demandas de 39 y 11 kWh/m² para la calefacción y refrigeración, especialmente por la incorporación de aislamiento térmico en las viviendas. Seguidamente, los bloques abiertos de gran altura DH y SH cuentan con valores de calefacción y refrigeración ligeramente mejores que la media, en torno a los 71 y 22 kWh/m². Pese a reducir el espesor de su fábrica cuentan con una cámara de aire y trasdosado que amortigua las condiciones externas. Con valores similares, los bloques de casco histórico presentan valores medios de calefacción de 74 kWh/m², mientras que la refrigeración es de 19 kWh/m², inferior a la media. Este hecho se debe a la combinación de anchos muros de fachada

y entramados de madera en patios, una gran cantidad de superficie adiabática por la superficie en contacto con las medianeras, a la que se añade una trama urbana de calles estrechas y patios interiores de pequeñas dimensiones que limitan el acceso solar viviendas. Las viviendas de la tipología HE, también incorpora una cámara de aire entre el muro y trasdosado, sin embargo, su superficie de envolvente adiabática se ve reducida por la elevada superficie de patios interiores de pequeñas dimensiones que cuenta con una elevada proporción de huecos. Este hecho se traduce en demandas de calefacción que llegan hasta los 81 kWh/m². Finalmente, las tipologías de bloques colectivos adosados y bloques abiertos de baja altura (CA, DL y SL), formados por 1 pie de ladrillo, cuentan con los peores valores de demanda de calefacción y refrigeración. Mientras que las demandas de calefacción son en torno a los 79 kWh/m² en todos los casos, las demandas de refrigeración se disparan en el bloque lineal de hilera simple, alcanzando los 27 kWh/m². Este hecho se debe a las malas propiedades térmicas de los cerramientos unido a una alta exposición de las viviendas, que cuentan con viviendas pasantes.

Para comprender mejor las diferencias entre las diferentes tipologías, es esencial conocer el comportamiento de las viviendas en función de la planta en la que están ubicados. Esto es especialmente relevante en edificaciones de baja altura. Mientras que en las edificaciones de gran altura como SH, las plantas medias tienen prácticamente los mismos valores que el conjunto del edificio. Sin embargo, en edificaciones de baja o media altura, existen diferencias significativas, especialmente cuando las propiedades térmicas de suelos y cubiertas en contacto con las viviendas son limitadas, como es el caso de CH.

En este caso se observa que de manera generalizada las plantas bajas cuentan con altos valores de calefacción y mínimas demandas de refrigeración. Las plantas medias son las que mejor se comportan y se caracterizan por presentar en ambos casos las menores demandas de calefacción y refrigeración. Finalmente, las últimas plantas tienen valores medios de calefacción y notablemente máximas demandas de refrigeración.

Este comportamiento presenta diferentes matices e intensidades. Por ejemplo, las tipologías históricas (HC y HE), pese a contar con locales comerciales en la primera planta, sólo lo hacen en las zonas próximas a la fachada, por lo que las plantas bajas, únicamente cuentan con viviendas interiores. El caso de CH, a este hecho se añade la ausencia de cámara de aire entre el solado y el terreno, lo que implica demandas de calefacción de hasta los 111 kWh/m². Por el contrario, en esta planta baja, también se alcanzan las necesidades de refrigeración mínimas de los casos estudiados con 7 kWh/m². Sin embargo, para aquellas situaciones en los que los locales comerciales o garajes que cubren toda la primera planta, como es el caso de CA las plantas bajas tienen valores más similares a la media.

Las plantas altas con cubiertas planas, como es el caso de HE, DH y SH, alcanzan los valores máximos de demanda de refrigeración, próximos a los 40 kWh/m² para DH y SH, mientras que para HE, es ligeramente inferior debido a la cubierta catalana. Esta solución constructiva también mejora la demanda de calefacción de la última planta de HE, sumado a la alta tradición solar que presenta la última planta HE respecto al resto de plantas. La tipología SL, pese a contar con cubierta inclinada, su

alta exposición de envoltente (cubierta y fachada) implica valores de 107 kWh/m², las máximas demandas de refrigeración en planta alta.

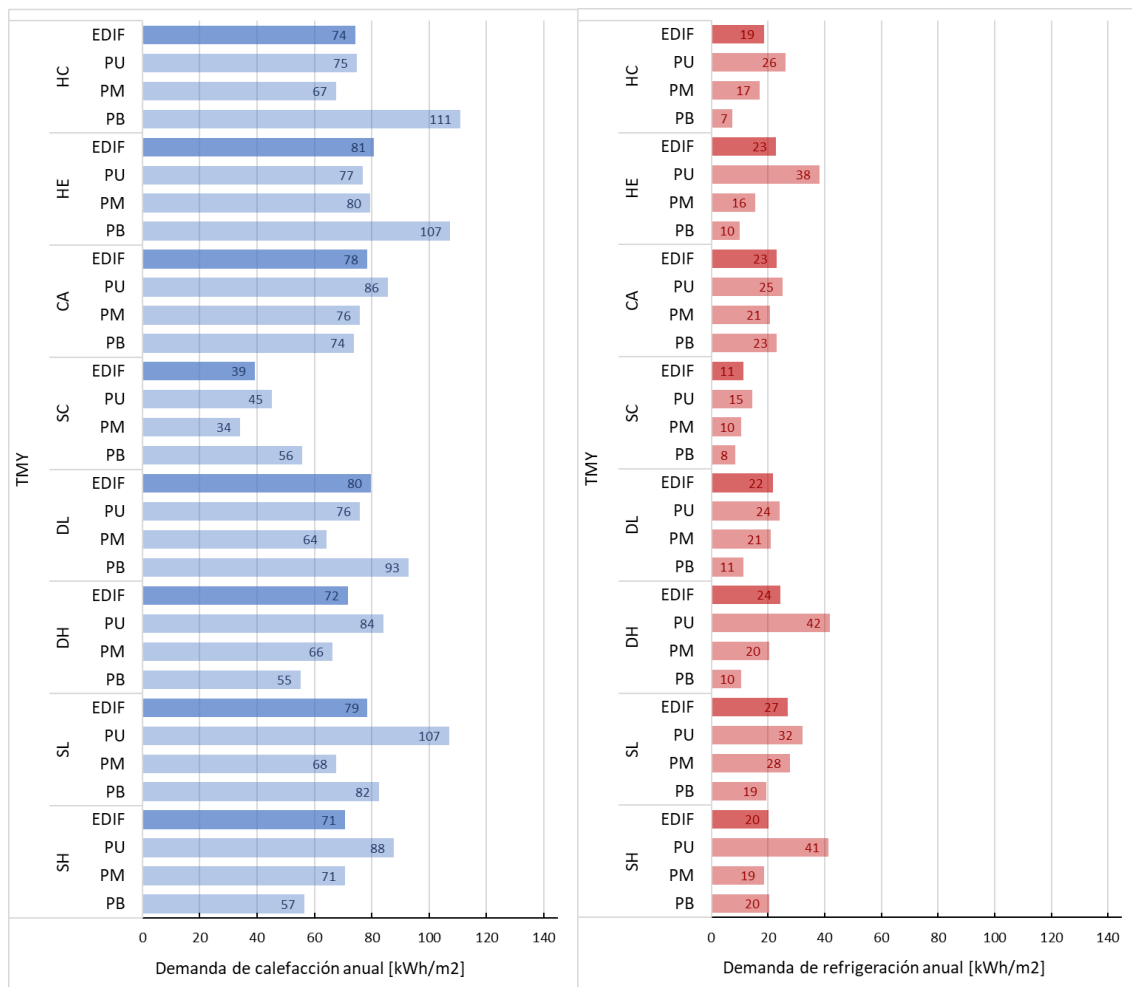


Figura 41. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs, para el clima TMY

Finalmente, para el estudio del comportamiento a nivel de plantas para el escenario SSP250, se ha acotado el análisis a las tipologías de vivienda colectiva SC, HC y SL. Éstas se han escogido por presentar los valores conjuntos de calefacción y refrigeración más bajos, medios y más altos y medios respectivamente, así como por su alta representatividad dentro del conjunto de la ciudad.

En este caso se observa cómo la demanda de calefacción es mucho menor, amortiguándose las diferencias entre las plantas alta y media, siendo especialmente evidente en SL, la tipología que más demanda de calefacción presentaba en el escenario TMY. De esta forma, mientras que para el clima TMY encontrábamos diferencias entre la planta alta y media de 39 puntos, en el caso SSP250 estas variaciones se reducen a 25 puntos. Por el contrario, la demanda de refrigeración es notablemente superior. En este caso las diferencias de demanda entre las planta media y alta se acentúan en todos los casos. Cabe destacar que la tipología SC, limita esas diferencias tanto en la demanda de calefacción como refrigeración, debido a la incorporación de aislamiento térmico.

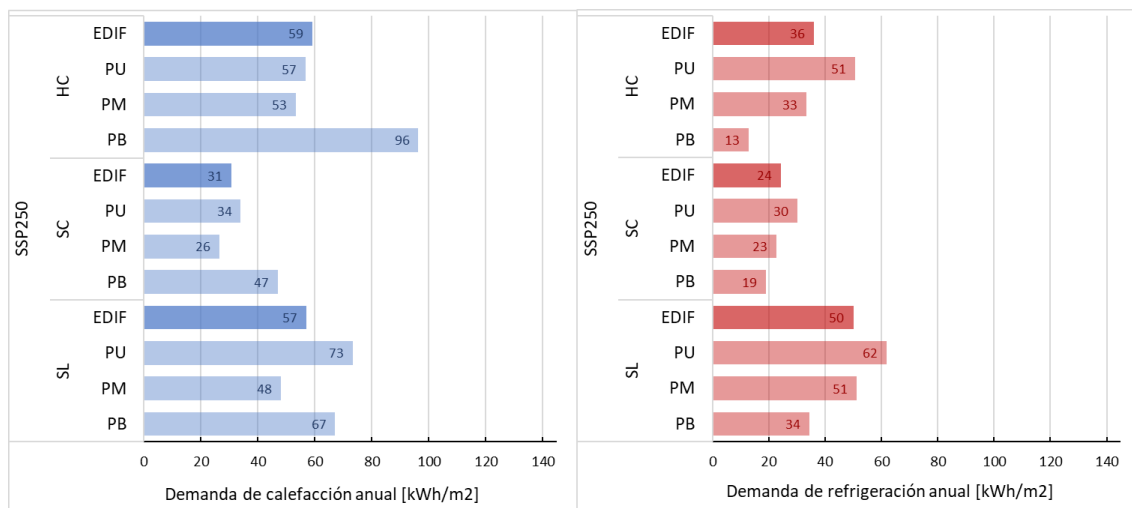


Figura 42. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL, para el clima SSP2 en el año 2050

7.3. Estrés térmico interior de las viviendas HUZs

En este apartado se centra en el estudio de la temperatura interior de las viviendas focalizando el análisis en las tipologías HC, SC y SL seleccionadas anteriormente, para el clima actual TMY y el escenario futuro SSP2 2050. Posteriormente, se analiza las condiciones de confort o estrés térmico originado por esas temperaturas interiores. Para todos los casos se ha considerado una evolución libre del edificio, sin contar con la activación de los sistemas de calefacción y refrigeración.

7.3.1. Temperatura interior de las viviendas

La Figura 43 muestra la evolución anual de las temperaturas del aire interiores de las viviendas seleccionadas para el estudio CH, SC y SL a nivel edificio y su relación con las temperaturas exteriores para el escenario climático actual y futuro SSP250. Complementando a estos valores se muestra los límites superiores e inferiores de confort, calculados siguiendo la EN 16798.

Para el clima actual TMY, el estrés pro frío abarca desde principios de noviembre hasta finales de abril, con temperaturas mínimas en el mes de enero, siendo para este mes, las temperaturas exteriores medias de 8°C y las interiores en torno a los 12°C. En el caso del escenario 2050, los periodos de estrés por frío son similares al TMY, con temperaturas exteriores medias en enero de 9°C e interiores de 13°C.

Por otro lado, en el caso del TMY el periodo fuera de confort en verano comienza a mediados de julio y termina a finales de agosto, alcanzándose temperaturas exteriores máximas que rozan los 40°C en el mes de agosto. Para este mismo mes, las temperaturas exteriores medias son de 28°C, similar a las temperaturas interiores de 29°C. Sin embargo, en el verano de 2050, estos límites adaptativos limitados a los 30°C son superados por las temperaturas desde el principio de la estación, a diferencia de los que ocurre en el clima TMY. Observándose un ligero pico en el mes de junio, pero haciéndose evidente desde principios de julio hasta mediados de septiembre, alcanzando en este caso valores de

temperatura exterior más próximos a los 45°C. Esto se traduce en que, en el mes de agosto las temperaturas medias exteriores son de 31°C y las interiores alcanzan los 34°C.

Como consecuencia del estrés por calor encontrado en 2050, el periodo de confort para este año disminuye, pese a que encontramos temperaturas límite adaptativas de confort más elevadas, especialmente durante los meses de primavera. En abril la temperatura exterior media es de 16 y 18°C para el escenario TMY y 2050 respectivamente con temperaturas interiores de 19 y 21°C.

Por otro lado, cabe destacar que en verano y primavera la tipología de bloques semiabiertos (SC) presenta valores de temperatura interior más bajos, la tipología de bloque lineal de baja altura alcanza claramente los valores más altos, mientras que la tipología de casco histórico (HC) se encuentra en un punto intermedio. En invierno y otoño, las tipologías presentan comportamientos similares, aunque SL alcanza picos superiores en invierno e inferiores en otoño.

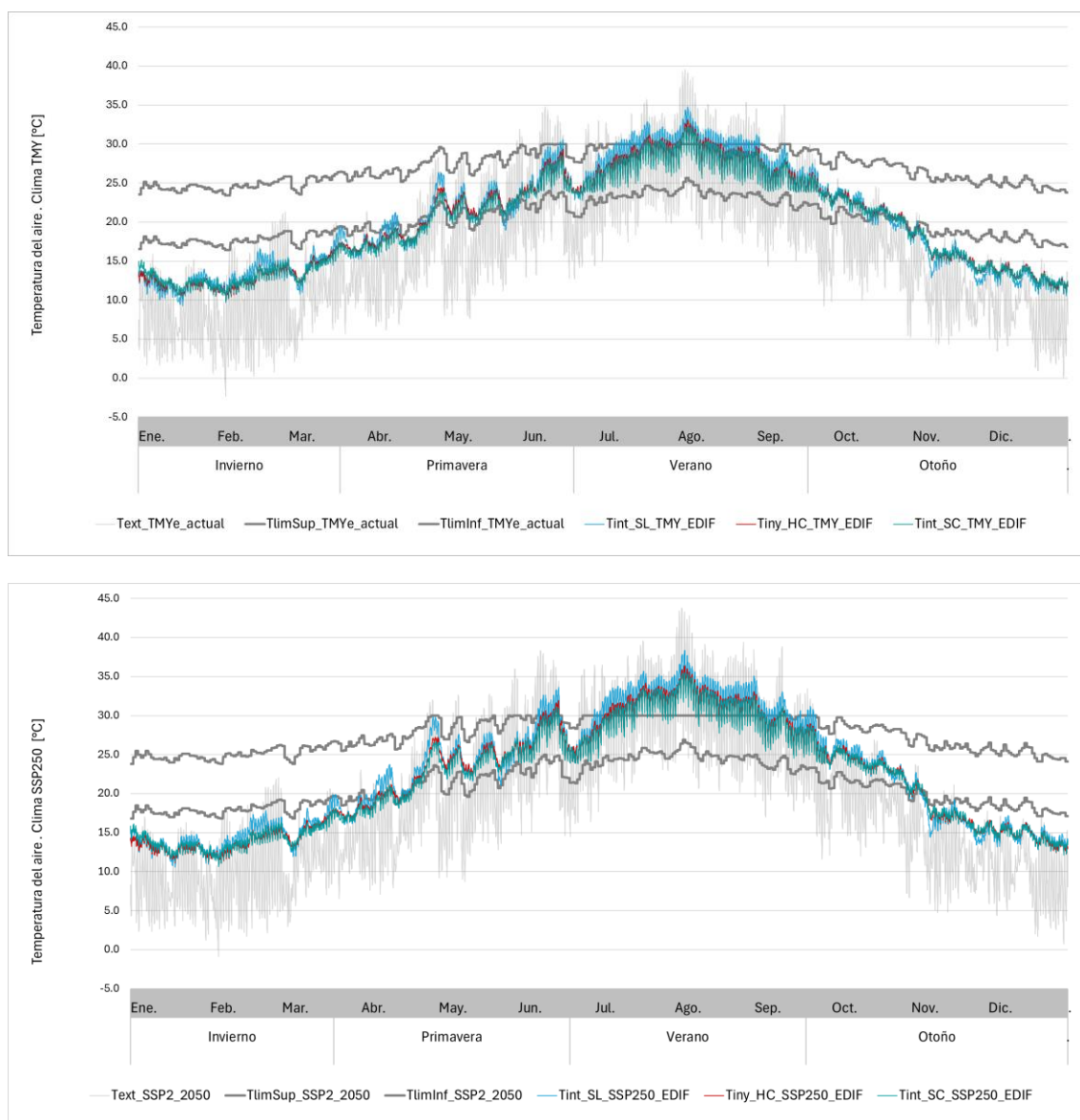


Figura 43. Evolución anual de las temperaturas interiores a nivel edificio en las viviendas colectivas seleccionadas HC, SC y SL y temperaturas exteriores para el clima actual TMY y SSP2- 2050.

7.3.2. Intensidad del estrés térmico para los diferentes escenarios climáticos

El análisis de las temperaturas interiores anteriormente analizadas muestra diferencias evidentes entre los diferentes climas y tipologías, que generan diferentes situaciones de estrés térmico. Con el fin de cuantificar dichas variaciones, este apartado detalla, el impacto térmico de los climas actuales (MET, IWECC y TMY) y futuros (SSP250 y SSP280) para las HUZs seleccionadas HC, SC y SL.

Para ello, se analiza el porcentaje de horas de confort y estrés térmico, así como su intensidad. Esta intensidad, se ha definido como el promedio horario de la temperatura fuera de los límites del confort.

La Figura 44, muestra en la zona central este porcentaje de horas de estrés por frío, confort y estrés por calor en (azul, verde y rojo respectivamente), mientras que en los laterales se muestra la intensidad. Al igual que anteriormente, se ha destacado los valores base del TMY, respecto a los escenarios actuales MET e IWECC y futuros SSP250 y SSP280.

El clima TMY muestra porcentajes medios para las tipologías de estrés por frío de 45%, similar al 48% de las horas de confort, mientras que el estrés por calor sólo ocurre en un 7% de las horas. Las intensidades por frío están en torno a 1,4°C y la intensidad por calor es prácticamente inexistente. Comparado con el TMY, los climas MET e IWECC muestran valores de porcentaje de horas e intensidad por frío superiores, con 61% y 56% respectivamente, asociadas a intensidades por frío de 2,7 y 2,3°C. Este aumento reduce el porcentaje de horas en confort medio en torno a 40%, mientras que el estrés por frío únicamente es del 3%. Por otro lado, el clima SSP2 muestra valores de estrés por frío inferiores al TMY, con cifras medias de 39% y 32% para el año 2050 y 2080 respectivamente, e intensidades también inferiores. Las horas de confort también se ven reducidas, a 38% para SSP250 y 37% para SSP280. Por el contrario, el estrés por calor aumenta hasta el 25% y el 31% de las horas para el 2050 y 2080, al igual que sus intensidades. Cabe destacar que, en 2080, que los valores de intensidad por calor son de 0.9°C, superando a las intensidades por frío.

Por otro lado, es interesante señalar que, para los escenarios futuros, el porcentaje de disminución de estrés por frío es menor que lo hace el incremento de estrés por calor. En particular la diferencia media de porcentaje de estrés por frío entre TMY y SSP2 es de 6 puntos (45% - 39%), mientras que para el caso del estrés por calor es de 17 puntos (7% - 24%). El mismo comportamiento se presenta para el clima SSP280, con diferencias de 13 (45% - 32%) y 24 puntos (7% - 31%) para el caso del estrés térmico por frío y calor respectivamente.

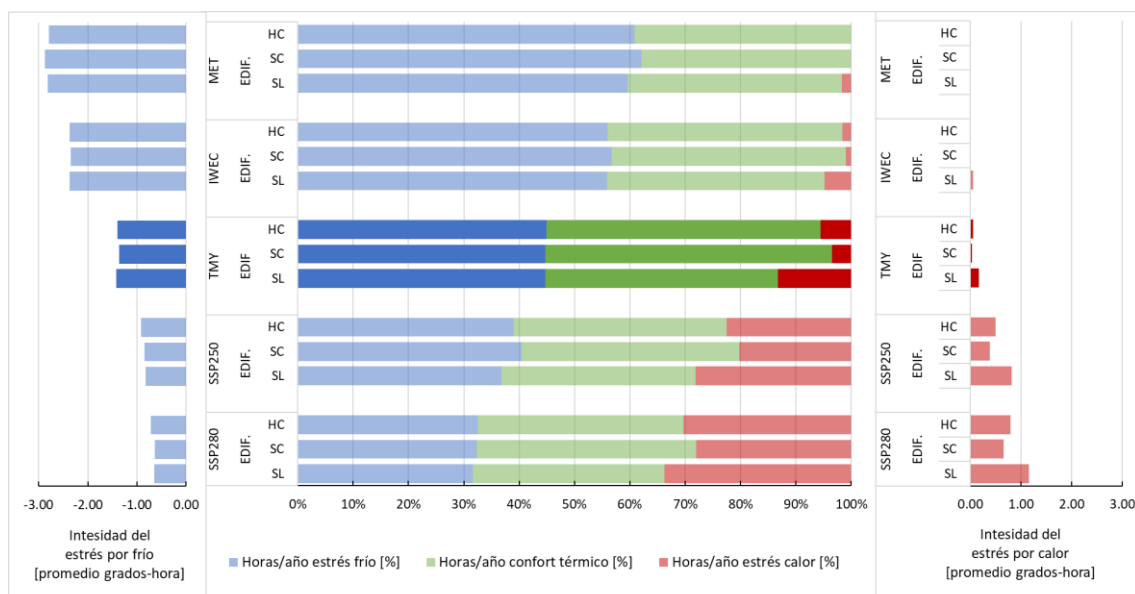


Figura 44. Porcentaje de horas de confort promedio de la intensidad del estrés térmico a nivel edificio para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL. Comparación de los climas actuales MET, IWE y TMY y proyecciones SSP2 en 2050 y 2080

7.3.3. Detalle de la intensidad del estrés térmico a nivel edificio y por plantas

Siguiendo la estructura anterior, el análisis del confort térmico para las tipologías se muestra en detalle en la Figura 45. Para las tipologías seleccionadas HC, SL y SL se destaca el valor para el promedio del edificio, mostrando también los datos por plantas.

A nivel edificio, las horas e intensidades de estrés por frío son muy parecidas para todas las tipologías, encontrado diferencias en el estrés por calor, que consecuentemente modifican los porcentajes de horas en confort. La tipología de bloque semi abierto (SC), muestra los menores valores de estrés térmico por calor con sólo un 3%, seguido del bloque da casco histórico (HC) con 6%, mientras que los bloques bajos de hilera simple (SL) llegan hasta el 13%.

Desagregando esta información por plantas, encontramos que, generalmente en las plantas bajas, el estrés por frío es mayor. Consecuentemente, en esta PB disminuyen las horas de estrés por calor, especialmente en la tipología de casco histórico (HC), donde prácticamente desaparece. En las plantas medias, el porcentaje de horas e intensidad de las plantas medias están próximos a la media del edificio. Por último, en las últimas plantas el porcentaje de horas de estrés por frío alcanza valores del 14%, reduciendo el tiempo de confort. Este hecho es más notorio para los bloques bajos en hilera simple (SL), donde en esta última planta, también cuenta con elevado porcentaje de estrés térmico por frío (sobrepasando el 50%) e intensidades superiores a 2°C. Para esta tipología SL, también es notable el alto porcentaje de estrés por calor en la planta media, con valores similares a los de la última planta.

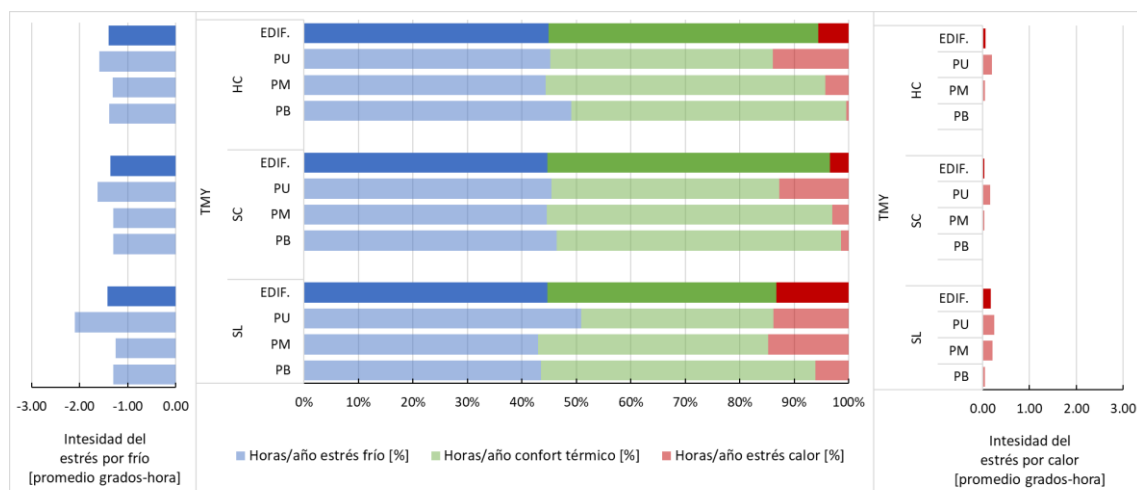


Figura 45. Porcentaje de horas de confort promedio de la intensidad del estrés térmico desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL, para el clima TMY

El análisis anterior se ha repetido mostrando los resultados para el escenario 2050. De esta forma, la Figura 46 estudia el comportamiento del porcentaje de horas e intensidad térmica para las tipologías HUZs seleccionadas HC, SC y SL con el clima SSP250.

En este caso, comparado con el TMY, el porcentaje de confort disminuye como consecuencia principal del aumento del estrés por calor. Este estrés por calor ocurre de forma destacada en las PU y con valores muy parecidos en las PM, a excepción de SC.

Cabe destacar la información que ofrece el valor de intensidad respecto al del porcentaje de horas. Pese a estar obviamente altamente relacionados, encontramos pequeñas diferencias en la información que ofrecen. Por ejemplo, en el porcentaje de estrés térmico en la planta media de SL es ligeramente superior al de la planta alta. Sin embargo, al analizar la intensidad de estas situaciones de estrés, vemos que este comportamiento se invierte, siendo ligeramente superior en la PU respecto a la PM. Este hecho está presente en el escenario TMY, pero se hace más notorio para SSP250. En este caso PM presenta valores de estrés del 30% de horas y 0,9°C de intensidad, mientras que PU tiene muestra cifras de 29% y 1,0°C. Este comportamiento también está presente para la tipología HC al analizar el estrés térmico entre su PB y PM.

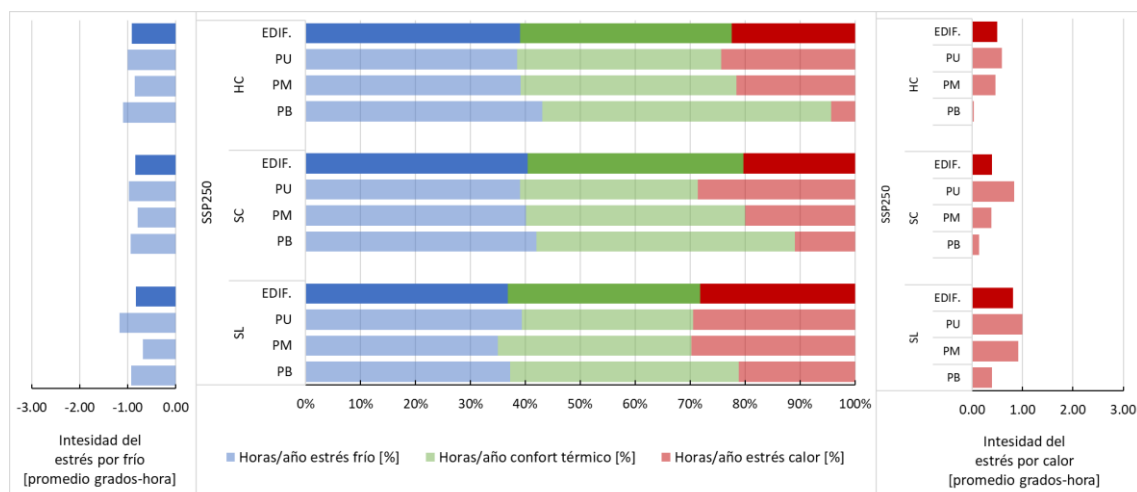


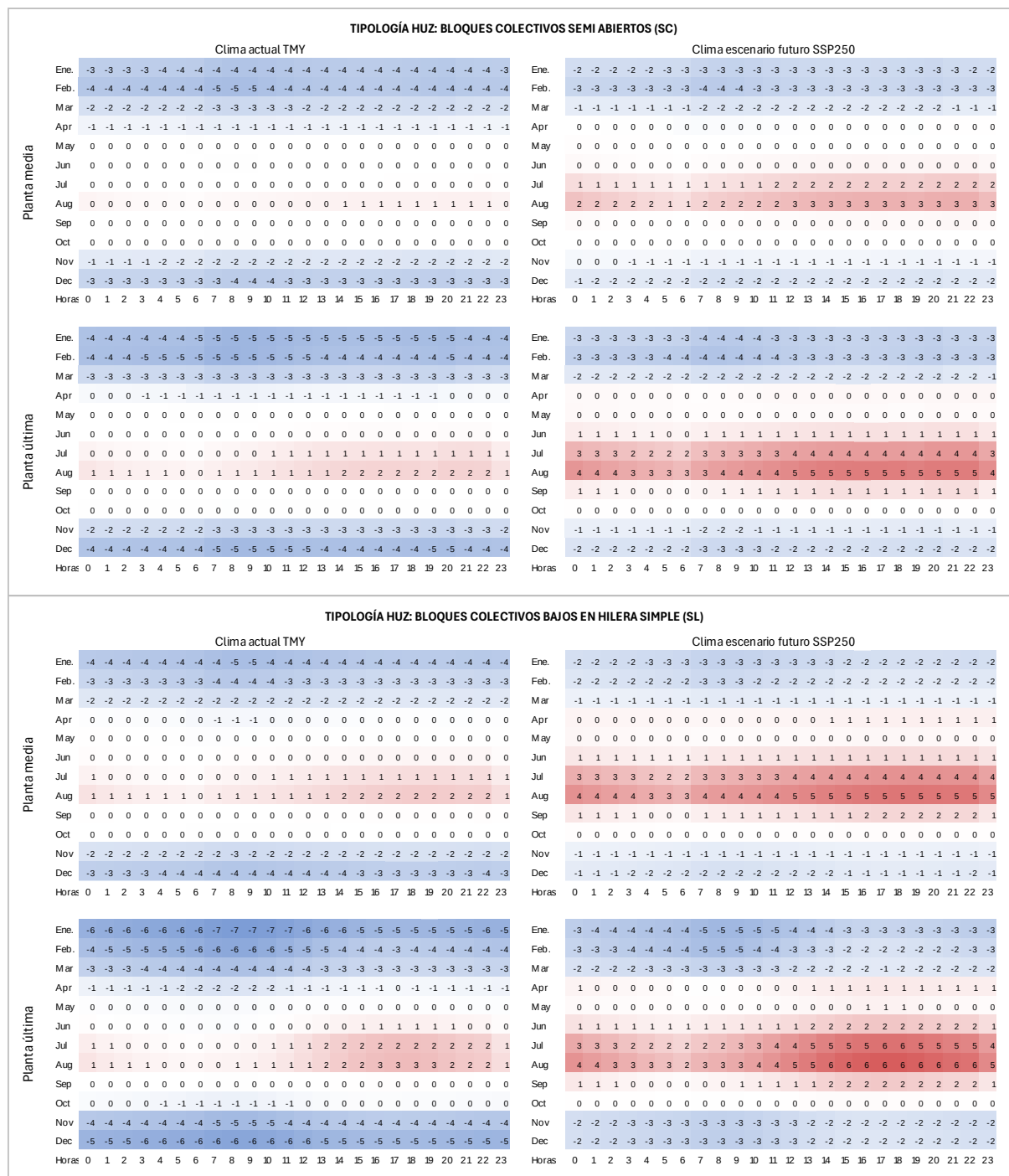
Figura 46. Porcentaje de horas de confort y promedio de la intensidad del estrés térmico desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL, para el clima SSP2 en el año 2050

Finalmente, la Figura 47 desglosa la intensidad del estrés térmico por horas, con el fin de conocer cuál es el mes y momento del día y en el que se concentran los máximos valores de estrés térmico. Para ilustrar esta información se ha escogido las tipologías HUZ de bloque semiabierto (SC) y bloque bajo en hilera (SL) y por ser, respectivamente la que mejor y peor se comportan térmicamente. Además, se ha escogido la planta media (PM), por ser representativa de lo que ocurre en el edificio y la planta última (PU), por ser en la que podríamos encontrar más situaciones de estrés térmico.

En los bloques SC para el clima actual TMY encontramos estrés por frío de los meses de noviembre a abril, tanto en la planta media como en la planta última, con picos en la última planta de hasta 5°C inferiores a la temperatura límite de confort a primera hora de la mañana en diciembre y febrero, pero que se alargan hasta las 11:00 en enero. En SL, pese a encontrar un comportamiento similar, las intensidades son mayores. El valor máximo de intensidad de 5°C está presente en la planta última durante todo el mes de diciembre, enero y parte de febrero, encontrado máximos de hasta 7°C en a primera hora de la mañana del mes de enero. Por otro lado, las intensidades de estrés por calor son apenas inexistentes en las plantas medias de SC, mientras que en la planta última existen situaciones de estrés por calor en la mayoría del mes de agosto y en gran parte del mes de julio (de 10:00-23:00), con valores máximo de 2°C por las tardes. Realizando este mismo análisis para SL, observamos que los valores máximos alcanzados por SC son registrados en SL, pero en su planta media. En la planta última de SL, sin embargo, la intensidad media es de hasta 3°C en agosto de 16:00 a 17:00.

Si comparamos estos resultados para clima SSP250, de nuevo vemos un patrón similar, pero con intensidades por frío ligeramente menores y durante menos tiempo, ya que no hay situaciones de estrés por frío en abril. Sin embargo, la intensidad por calor es indudablemente mayor. En este caso para la tipología SC, encontramos situaciones de estrés por calor durante todo el mes de julio y agosto en la PM, que se amplían también en junio en la última planta. En el caso de la tipología SL, el estrés por calor incluso está presente moderadamente en el mes de abril, que en el que el escenario actual

encontrábamos situaciones de estrés por frío. Pero el estrés por calor se hace muy evidente desde junio hasta septiembre en las plantas medias y altas. En julio y agosto encontramos mínimos de intensidad de estrés por calor de 2°C durante las horas de madrugada y máximos por las tardes con intensidades máximas de 4°C a 6°C.



7.4. Conclusiones

A partir del análisis energético y térmico de las HUZs se pueden enunciar diferentes conclusiones desde el punto de vista del modelado, así como de los resultados de demanda energética y estrés térmico.

- La aproximación de la simulación muestra un análisis detallado y optimizado, mediante la representación del entorno urbano y el estudio de viviendas representativas. Para ello, se han considerado una zona de análisis para cada actividad (zonas comunes, comercios, garajes y viviendas). Sin embargo, para el análisis sólo se han considerado las zonas residenciales, las cuales se promediado en función de su superficie mostrando resultados a nivel edificio, pero también desagregando estos resultados por plantas y edificación completa.
- El modelo se ha contrastado comparando valores de temperatura simulados y monitorizados durante una campaña experimental llevada a cabo en diferentes viviendas durante el verano del 2024. Este análisis muestra variaciones que reflejan la ya conocida dificultad de evaluar los parámetros de ocupación y sus discrepancias con los valores propuestos por el CTE, especialmente en cuanto a la ventilación nocturna. Pese a la utilidad de los climas representativos, como era de esperar, también se ha enfatizado las diferencias entre las condiciones climáticas para un momento concreto y el TMY que presenta valores más suavizados. En cualquier caso, el análisis estadístico de los errores verifica los resultados obtenidos en los modelos.
- El análisis energético muestra que actualmente las demandas medias para las tipologías colectivas HUZs son de 72 kWh/m² de calefacción y 21 kWh/m² de refrigeración (clima TMY). El clima normativo MET y el ampliamente utilizado IWEK parecen no estar considerando las condiciones climáticas actuales de la ciudad, puesto que comparado con el TMY presentan valores de demanda de calefacción un 70% y un 50% más y demandas de refrigeración claramente inferiores, en torno a la mitad. En cambio, considerando un futuro continuista (SSP2) se prevé respecto a la situación actual una reducción de calefacción en un 20 y 30% para 2050 y 2080, mientras que, para estos mismos años, la refrigeración aumentaría en un 200% y 250%. Además, cabe destacar que en 2080 las demandas de refrigeración superarían a las de calefacción (47 kWh/m² y 52 kWh/m² respectivamente).
- Las propiedades térmicas de la envolvente, pero también la morfología y el entorno urbano resultan clave a la hora de evaluar energéticamente la edificación. La tipología de bloque semiabierto, al contar con aislamiento (0,72 W/m²K), presenta los menores valores de calefacción y refrigeración (39 y 11 kWh/m² respectivamente). La tipología de casco histórico (HC) presenta valores medios, el espesor de los muros de las edificaciones de fachada (0,96 W/m²K) y la alta superficie adiabática amortigua las demandas energéticas, especialmente en verano debido a la limitación de la radiación solar de la estructura urbana y patios interiores. Por el contrario, una elevada exposición a la radiación solar pese a que resulta beneficiosa en invierno, aumenta claramente las demandas de refrigeración en verano, especialmente en envolventes poco

eficientes. Esto se evidencia en los bloques bajos en hilera (SL), que además de presentar altos valores de refrigeración, presenta las máximas demandas de refrigeración de los bloques analizados (27 kWh/m^2), siendo la edificación con mayor demanda energética. Esto ocurre pese a tener los mismos sistemas constructivos ineficientes (muros de $1,79 \text{ W/m}^2\text{K}$) que los bloques bajos en hilera doble (DL) y bloques de manzana cerrada (CA), que cuentan con una mayor superficie adiabática y menor exposición solar.

- Además, el análisis detallado por plantas resulta esclarecedor, ya que ayuda a comprender el comportamiento global del edificio, especialmente en aquellas edificaciones de baja altura, donde las plantas bajas y altas cobran más protagonismo. De forma generalizada la calefacción es mínima en las plantas medias y máxima en las altas, mientras que la refrigeración es mínima en las plantas bajas e igualmente máxima en las plantas altas. Sin embargo, también en este caso la morfología constructiva y distribución de espacios modifican estos patrones. Las locales en planta baja reducen notoriamente las demandas de calefacción en las siguientes plantas como se muestra en las tipologías de bloques altos en hilera (DH y DH) y CA. Además, en las plantas bajas también son clave los forjados sanitarios para limitar la demanda energética de calefacción. En las plantas altas las cubiertas planas en contacto directo con las viviendas aumentan claramente la refrigeración como se evidencia en HE, DH y SH, que presentan los máximos de calefacción en sus plantas altas (en torno a 40 kWh/m^2).
- El estudio del confort térmico permite conocer la situación de los hogares desde la perspectiva de su habitabilidad. La metodología adaptativa EN 16798 permite evaluar mejor las condiciones de los hogares, puesto que tiene en cuenta la adaptación de los individuos al entorno. Además del cálculo del porcentaje de horas de confort, la estimación de la intensidad del estrés permite cuantificar mejor la realidad climática.
- Acorde a la aproximación anterior, los resultados muestran que, actualmente (TMY), encontramos estrés por frío desde principios de noviembre hasta finales de abril (un 45% de las horas anuales, con intensidades medias de $1,4^\circ\text{C}$), siendo este comportamiento similar en 2050 (SSP250), pero con intensidades notablemente menores ($0,85^\circ\text{C}$) y teniendo o de media en los dos casos temperaturas interiores entorno a los 12°C en enero. Por otro lado, el estrés por calor está presente desde mediados de julio a finales de agosto (un 7% de las horas) con temperaturas interiores medias en agosto de 29°C , que aumentarían hasta los 34°C en 2050, al igual que se alargaría el periodo de estrés por calor hasta un mes (julio hasta mitad de septiembre), lo que supondría un aumento de las horas de confort hasta 23%.
- Como consecuencia de las características de la envolvente, la tipología más afectada al estrés térmico es SL, especialmente en sus plantas altas, con sólo de media para el edificio, un 42% de las horas en confort, al contrario que HC y SC que cuentan con un 50 y 52% respectivamente. En 2050 se prevé que se agudice esta situación como consecuencia del aumento de las horas de estrés por calor, reduciéndose las horas de confort al 35%, 38% t 39% para SL, HC y SC. En este caso las

diferencias no son tan evidentes, ya que las plantas medias también presentan altos valores de estrés térmico en calor, a diferencia de SC, debido a uso del aislamiento térmico.

- El análisis horario ayuda a comprender el comportamiento térmico descrito anteriormente. Actualmente, las horas de madrugada, son las que mayor estrés por frío presentan, donde encontramos temperaturas por debajo del límite del confort desde noviembre a abril, con valores de unos 5°C en enero, pero que llegan hasta los 7°C en las últimas plantas de SL. Por el contrario, las tardes es donde se encuentran temperaturas interiores superiores al límite de confort desde mediados de julio a finales de agosto, con valores en torno a los 2°C. Esta situación se agudiza claramente en 2050, aumentándose las horas (junio a septiembre) y la intensidad esta vez con cifras medias en agosto 5°C, pero que pueden llegar hasta los 6°C en SL.

8. Metodología de actuación energética prioritaria

Los datos obtenidos anteriormente, permiten cateterizar profundamente la situación energética y el parque edificatorio actual de las viviendas de Madrid. Este estudio facilita la identificación de viviendas con mayor potencial de ahorro energético. Sin embargo, a la hora de diseñar políticas públicas de mitigación y adaptación al cambio climático, es primordial conocer cuál es la capacidad de los hogares a hacer frente a esas estrategias de renovación. En base a ello, este capítulo se centra en una primera aproximación para definir una metodología de actuación energética prioritaria, donde facilitar el acceso a dichas intervenciones es esencial para mejorar las condiciones de vida de los hogares y reducir el gasto energético asociado a la edificación. Para ello, se han definido los siguientes objetivos:

- i) Generar una base de datos geolocalizada a nivel de edificio que recoja las principales variables para la definición de los indicadores energéticos prioritarios desde la perspectiva de riesgo térmico. Definir el riesgo térmico considerando factores de exposición y vulnerabilidad.
- ii) Cuantificar el potencial vínculo entre urbanismo y estrés térmico en los hogares mediante la combinación de HUZs y el índice de riesgo térmico. Representar estos factores en la ciudad de Madrid, identificando las edificaciones y áreas donde la intervención energética debería ser prioritaria

8.1. Base de datos de Madrid. Indicadores energéticos prioritarios

Como se ha definido en la sección 2.3. los factores que determinan el riesgo térmico, y por tanto aquellos en los que la rehabilitación energética debería ser prioritaria, dependen del nivel de exposición y vulnerabilidad de los hogares. Para ello, este apartado se centra en definir un índice de prioridad energética que combine estos factores.

Nivel de exposición

El indicador de gasto energético se presenta un factor determinante para deducir las condiciones de las viviendas cuando se desconocen las características térmicas de los hogares. Sin embargo, desde el punto de vista de la exposición, la demanda energética se presenta como un indicador clave, ya que está relacionado con las propias condiciones del edificio. Además, como describe la Sección 2.1., otros factores como el gradiente térmico de la ciudad o el confort térmico influyen en la cuantificación del nivel de exposición. Las diferencias microclimáticas de la ciudad están vinculadas en gran medida a los parámetros urbanos, siendo estas evidencias especialmente notables por las noches y modificado de esta forma la demanda energética edificatoria y el confort térmico [272], [274]. Por otro lado, la evaluación del confort térmico permite evaluar el porcentaje de horas y la intensidad de la exposición al estrés [356].

Pese a la relevancia de estos los factores intensificadores de gradiente térmico urbano y el confort térmico, en una primera aproximación, este trabajo sólo ha considerado para el estudio del nivel de exposición el indicador de demanda energética. En este sentido, la identificación, clasificación y

caracterización de las HUZ, han permitido generar una amplia base de datos para la ciudad de Madrid, con diferentes factores que influyen en la caracterización térmica y energética. Por un lado, el enfoque urbano de las HUZs mediante una aproximación *top-down*, ha facilitado la caracterización del parque edificatorio considerando, no sólo el edificio, sino también su entorno urbano. También, el enfoque edificatorio ha permitido estudiar de forma exhaustiva el comportamiento energético y térmico de las viviendas representativas HUZs. A través de la clasificación previa, estos resultados han sido inferidos al resto de la ciudad mediante una aproximación *bottom-up*. Además de manera implícita, estos resultados están considerando el factor determinante del clima, tanto en la definición propia de las HUZs, como en el uso de del archivo climático TMY, actualizado y registrado en la ciudad de Madrid.

Nivel de vulnerabilidad

Por otro lado, para analizar la vulnerabilidad de los hogares al estrés térmico el nivel de renta se presenta como el factor más determinante en la evaluación energética prioritaria. Como describe la Sección 2.1 y la Sección 2.3., otros factores modificadores están relacionados con la condición social (la edad, el sexo, el nivel de estudios, la intensidad laboral, el régimen de tenencia o el origen) y las condiciones de salud (enfermedades crónicas físicas o mentales).

De la misma forma que se ha descrito anteriormente, con el objetivo de delimitar el estudio, se ha seleccionado únicamente el nivel de renta neta media de los hogares, por ser un indicador primordial en el análisis de vulnerabilidad y facilitar la comparación entre edificios y hogares. Para ello se ha utilizado el indicador de los datos ofrecidos por el Atlas de Distribución de Renta de los Hogares para el año 2022, proporcionado por el INE [357]. Estos datos, se presentan a nivel de sección central, por lo que se les han asignado los mismos valores a todos los edificios de la sección censal. Este nivel de análisis alberga conjuntos de poblaciones alrededor de los 1.000 habitantes y pese a que esto pueda parecer un condicionante en el análisis, es la escala más pequeña que ofrece datos socioeconómicos estadísticos.

Índice del riesgo energético

Finalmente, para la definición del riesgo energético se han combinado los factores definidos anteriormente.

Por un lado, el nivel de exposición se ha caracterizado en función de las condiciones energéticas y térmicas de las viviendas a través de los indicadores de demanda de calefacción y demanda de refrigeración. Por otro lado, el nivel de vulnerabilidad se ha definido como la capacidad de afrontar el gasto energético de las viviendas. La Tabla 18 muestra la combinación de dichos parámetros, asignándoles a los indicadores de exposición y vulnerabilidad los mismos pesos. Por otro lado, para los indicadores de demanda, también se le ha asignado una ponderación equitativa. Esta decisión se basa, en dos conceptos que incluyen la perspectiva a largo plazo que hay que tener en la rehabilitación energética, en la que deberíamos no sólo tener en cuenta las condiciones actuales, sino futuras. En este sentido como se ha puesto de manifiesto en el capítulo anterior, pese a que en la actualidad las

demandas de refrigeración son superiores a las de calefacción, ante un escenario continuista se prevé que estas proporciones se igualen (SSP280).

ÍNDICE DEL RIESGO ENERGÉTICO: Promedio de EXPOSICIÓN + VULNERABILIDAD			
INDICADOR DE VARIABLES DE EXPOSICIÓN	Condiciones energéticas- térmicas de la vivienda	Demanda de calefacción (kW/hm ²)	50%
		Demanda de refrigeración (kW/hm ²)	50%
INDICADOR DE VARIABLES DE VULNERABILIDAD	Capacidad de afrontar el gasto energético	Renta media neta de los hogares (€)	100%

Tabla 18. Definición de riesgo energético. Combinación de demanda energética y renta media de los hogares.

A raíz de estos valores, se ha generado una base de datos geolocalizada para la ciudad de Madrid con información a nivel de edificio que contienen indicadores urbanos, edificatorios y energéticos que han sido necesarios para la caracterización HUZ, a los que se le ha unido el factor de renta media edificatoria.

Con el fin de poder comparar estos condicionantes energéticos y socioeconómicos, se han homogenizado estos valores mediante el cálculo de su percentil. De tal forma que, primero se ha calculado el percentil al que pertenece cada edificio dentro del conjunto de valores. Posteriormente, los valores obtenidos para cada edificio se han promediado en función de los pesos descritos anteriormente. Este valor promedio corresponde con el índice de riesgo energético, donde 1 corresponde a un riesgo alto ya que combina una alta exposición (alta demanda energética de calefacción y refrigeración) y alta vulnerabilidad (bajo nivel de renta media neta). Por otro lado, los valores cercanos a cero serán aquellos en los que cuentan con un bajo valor de exposición y un bajo valor de vulnerabilidad.

8.1.1. Definición del nivel de exposición energética-térmica de la ciudad

Los datos obtenidos de demanda energética de calefacción y refrigeración se han representado a nivel de la ciudad, como muestra la Figura 48. Aunque a cada edificio se le asignado el percentil concreto al que pertenece, con el fin de facilitar la interpretación de estos datos, las escalas de color representan la segmentación de estos valores por deciles.

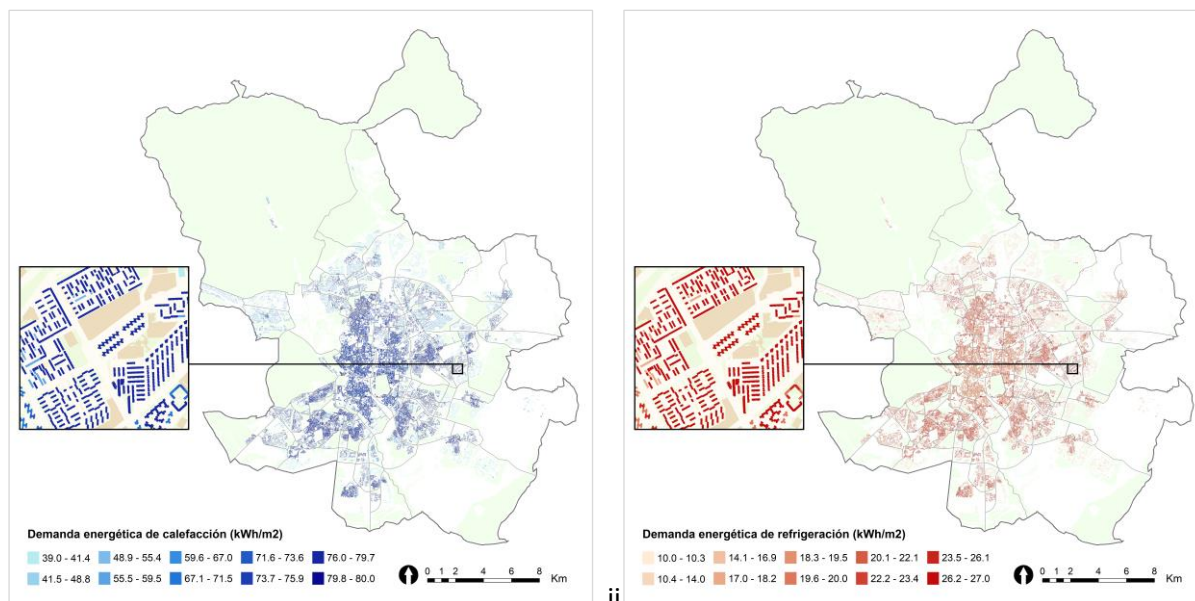


Figura 48. Demanda de calefacción y refrigeración de Madrid, obtenida a través de la metodología HUZ

El promedio de los percentiles de calefacción y refrigeración han definido el nivel de exposición, el cual se representa en la Figura 49. Como era de esperar, en base a los resultados del capítulo anterior, aquellas áreas en las se combina una baja demanda de calefacción y refrigeración, principalmente localizados en el último anillo de la periferia y que en su mayoría corresponden a bloques semiabiertos, que representan valores de bajos de calefacción y refrigeración y consecuentemente un reducido nivel de exposición. Por el contrario, los bloques de viviendas bajas de hilera simple, como las que se muestran en el área ampliada de la imagen, localizadas en un primer anillo de la ciudad, combinan altos valores de calefacción y refrigeración presentan altos niveles de exposición. Los edificios del casco histórico, ubicados en un primer núcleo del centro de la ciudad, que muestran altos valores de demanda de calefacción, pero con bajas de mandas de refrigeración, lo que se traduce en un nivel de exposición medio.

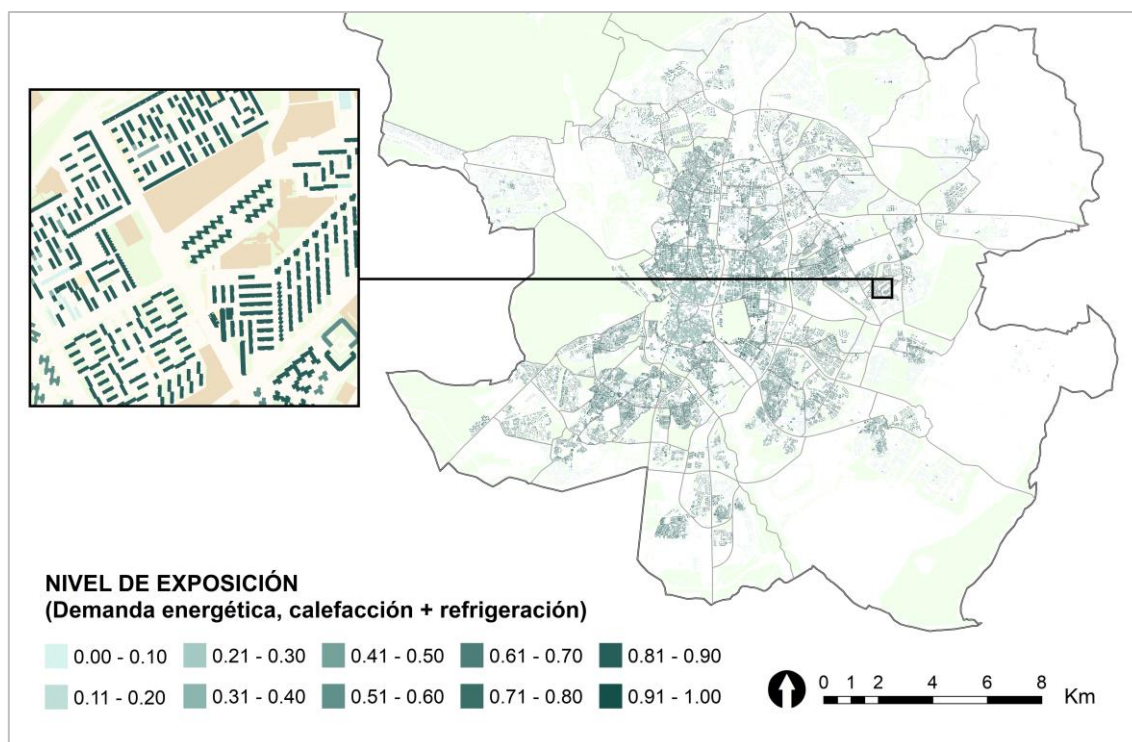


Figura 49. Indicador del nivel de exposición (combinación de demanda de calefacción y refrigeración) para la ciudad de Madrid.

8.1.2. Definición del nivel de vulnerabilidad socioeconómica

Para la definición de la vulnerabilidad socioeconómica, se ha usado el mismo procedimiento anterior. Se ha calculado el percentil para cada edificio, en este caso, únicamente con un parámetro que corresponde directamente con el nivel de vulnerabilidad. Para no repetir información, en este caso sólo se muestra los valores de renta a los que correspondería cada decil, como muestra la Tabla 19.

Distribución de deciles de la renta media bruta de los hogares (€)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10035	11143	12408	13908	15910	18969	22062	25615	33887	34765

Tabla 19. Cálculo de deciles para el parámetro promedio de renta media neta de los hogares de Madrid

De esta forma, el nivel de vulnerabilidad se representa en la Figura 50. Se observa que las zonas con un mayor nivel de vulnerabilidad están ubicadas en zonas más dispersas, especialmente en el radio sur y sur oeste de la ciudad, que corresponden principalmente a áreas urbanas de bloques en hilera de bajas altura y boques de mazana cerrada. De igual modo que ocurría para el análisis del nivel de exposición, los niveles de vulnerabilidad más bajos se concentran en el radio más externo de la ciudad y también en este caso el eje centro norte, donde se encuentran principalmente los bloques semiabiertos y las viviendas unifamiliares modernas y aisladas vintage.

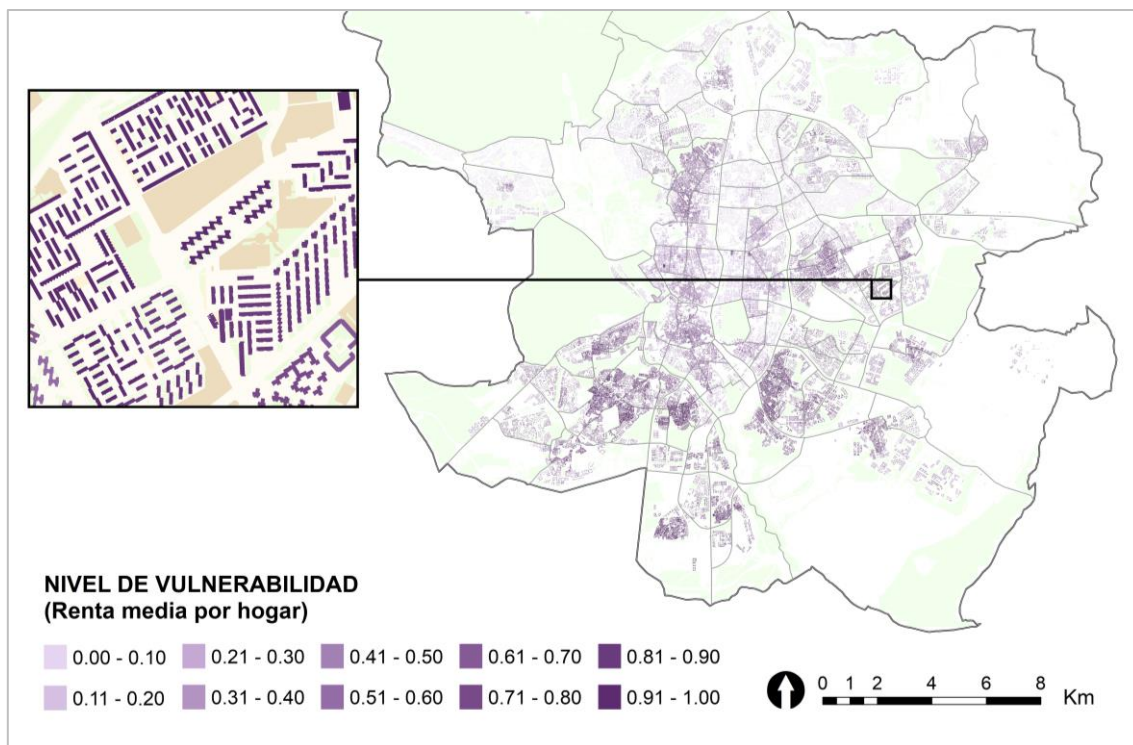


Figura 50. Indicador del nivel de vulnerabilidad (renta neta media por hogar) para la ciudad de Madrid.

8.2. Representación del índice de riesgo energético

Finalmente, los promedios obtenidos para el nivel de exposición y riesgo han definido el índice de riesgo energético. Además, en este apartado se ha calculado cual es el promedio de este índice para cada tipología HUZ, con el fin de ver cuál es la relación entre urbanismo y riesgo energético.

8.2.1. Definición del índice de riesgo energético

La Figura 51 muestra los valores de índice de riesgo calculados para la ciudad de Madrid. De forma detallada, en la zona ampliada de la imagen, se pueden observar las pequeñas diferencias entre viviendas cuando se aumenta la resolución.

En términos generales, se observa que los valores más bajos se encuentran en los radios más alejados de la ciudad, especialmente en la zona norte con valores hasta los 0,2 puntos. El centro de la ciudad y su zona de Ensanche presenta valores entre 0,2 a 0,6 puntos. Finalmente, el radio fuera del Ensanche ubicado en el arco oeste, sur y este, y puntualmente en el norte tiene valores entre 0,6 y 1,0 puntos.

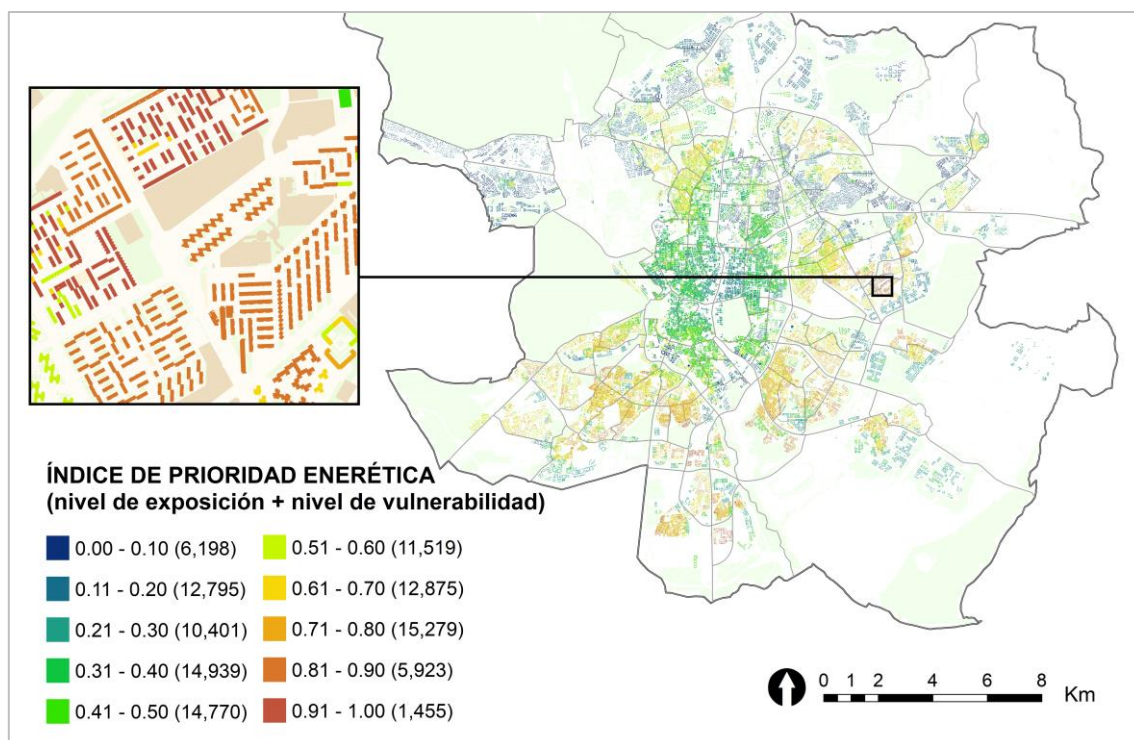


Figura 51. Índice de riesgo energético (nivel de exposición y riesgo) para la ciudad de Madrid.

8.2.2. Relación entre el índice de riesgo y las Zonas Urbanas Homogéneas

Para completar la caracterización de las Zonas Urbanas Homogéneas, se ha estudiado en detalle cual es el comportamiento energético global de las HUZS (considerando de forma conjunta la calefacción y la refrigeración). Además, se ha evaluado el posible vínculo entre la aproximación energética y socioeconómica de las HUZS.

En este sentido, la Figura 52 representa el orden de clasificación obtenido para los indicadores de nivel de renta y vulnerabilidad y su indicador de riesgo energético, considerando su valor promedio.

Analizando los valores de índice de riesgo energético encontramos las siguientes observaciones:

Las viviendas unifamiliares modernas (DV y TR), presentan un valor de exposición medio-bajo, pero los menores valores de vulnerabilidad, lo que se traduce en unas cifras mínimas de índice de exposición, de 0,18 y 0,21 para TR y DS respectivamente. Los bloques de manzana semiabiertos (SC), con mínimos valores de exposición y cifras medias de vulnerabilidad, también presentan un índice de vulnerabilidad muy bajo de 0,24 puntos. Similar a SC, las viviendas unifamiliares vintage (TV y DV) presentan de media bajos valores de exposición y bajas cifras de vulnerabilidad, que implican índices de riesgo de 0,25 y 0,31 puntos.

Los bloques de casco histórico (HC) tienen una exposición baja-media y valores medios de vulnerabilidad, consecuentemente un índice de riesgo de 0,41. Por el contrario, los bloques de Ensanche (HE), presentan un peor comportamiento de exposición, comparado con los bloques de casco histórico y una vulnerabilidad baja, que se traduce en niveles de riesgo similares.

Los bloques altos en hilera tanto doble como simple (DH y SH), tienen un comportamiento muy similar, con valores medios de exposición y vulnerabilidad, consecuentemente valores medios de riesgo de 0,47 y 0,50 respectivamente.

Finalmente, las tipologías bajas en hilera doble y simple (DH y SL) se caracterizan por altos valores de exposición y vulnerabilidad, y por tanto un alto índice de riesgo para DL (0,66 puntos) y especialmente para SL con 0,73 puntos. Con valores similares, destaca la tipología de bloques bajos de manzana cerrada (CA). Sin embargo, las viviendas CA, pese a contar un nivel de exposición más reducido, el nivel de vulnerabilidad es máximo, lo que conlleva también altos valores de riesgo.

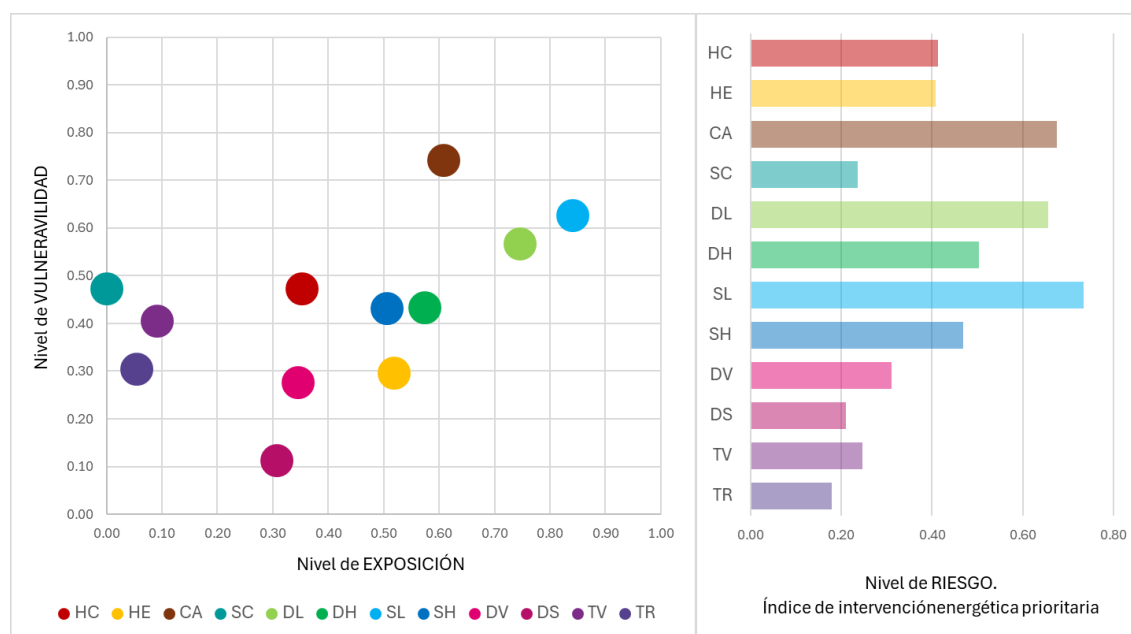


Figura 52. Nivel de exposición y vulnerabilidad. Índice de riesgo energético asociado a las HUZs.

Con el fin de profundizar en este comportamiento, la Figura 53 muestra la dispersión del índice de nivel de riesgo. De esta forma aquellas HUZs que tienen un reducido rango intercuartil ($q1-q3$), pueden asimilarse claramente al índice de riesgo que presentan. Esta situación se evidencia especialmente en la tipología de bloques de Ensanche (HE), bloques bajos de hilera simple (SL), viviendas unifamiliares aisladas modernas (DS) y en cierta forma en bajos de manzana cerrada (CA). Por otra parte, las viviendas unifamiliares vintage (DV y TV), muestran rangos más amplios, en los que además su mediana muestra valores inferiores a la media, por los que su asimilación a un índice de riesgo no es tan nítida.

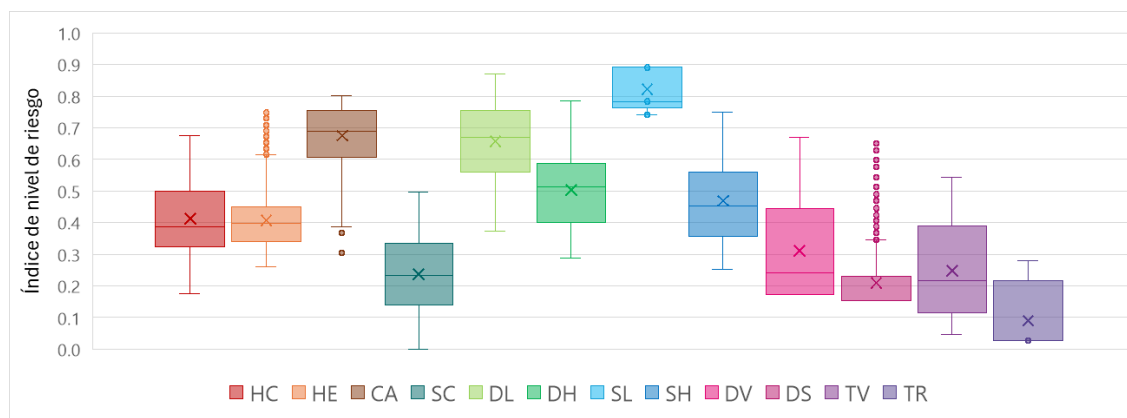


Figura 53. Índice de riesgo energético asociado a las HUZs, mostrando sus valores medios (cruces), mediana (línea horizontal), rango intercuartil (caja) y valores atípicos (puntos).

A modo de tener una noción de la relación del índice de riesgo y clase HUZ de la ciudad, la Figura 54 muestra este vínculo por barrios. Para ello se le ha asignado a cada barrio, su tipología HUZ más frecuente (en función del área que ocupan la huella de las edificaciones) y se ha calculado el promedio de su índice de riesgo. Con el fin de facilitar su comprensión, los resultados se han ordenado de mayor a menor nivel de riesgo y se han clasificado en diferentes líneas: índices de riesgo altos, medios y bajos. Acorde con lo que muestran la Figura 52 y la Figura 53, se presenta el siguiente comportamiento:

- Los valores más altos de riesgo, aproximadamente entre 0,9-0,6, ocurren en las tipologías de bloques bajos de hilera simple, bloques bajos de manzana cerrada y bloques bajos en hilera doble (SL, CA y DL). Los máximos los encontramos en SL mostrando los índices de riesgo máximo en barrios como San Cristóbal, Amposta o Hellin. La tipología CA también muestra unos números muy elevados especialmente para las zonas de Pradologo y Zofío. Además, la tipología DL también presenta valores altos de índice de riesgo, en áreas como Campamento o Vinateros.
- Con valores medios de índice de riesgo, entre 0,6 y 0,2, siguen estando presente la tipología CA, pero lo encontramos principalmente en HUZs de bloques de Ensanche (HE) como Pacífico o Delicias. También son frecuentes los bloques de casco histórico (CH), con barrios como Emabajadores, Imperial o Sol. Además, están presente las tipologías de bloques altos en hilera en barrios como Catillejos (DH) y La Paz (SH).
- Para valores de índice comprendidos entre 0,4 y 0,3, encontramos las tipologías de bloques semiabiertos (SC), en barrios como Rejas o las Rosas y viviendas unifamiliares en hilera vintage (TV) en las áreas de Canillas o el Pardo.
- Finalmente, en un último bloque, para valores de índice de riesgo inferiores a 0,2 puntos, están presentes en las tipologías de bloques semiabiertos y viviendas unifamiliares, especialmente las aisladas o pareadas (DS). Con valores muy bajos, la tipología DV es muy frecuente en los barrios de Hispanoamérica y Nueva España. Finalmente la tipología TR y especialmente la DS presenta los valores mínimos en barrios que corresponden a Aravaca, El Palantío o Palomas.

Cabe destacar que, en este caso, debido a la distribución de los valores comentados en la Figura 53, la relación entre el índice de riesgo y la tipología HUZ en ocasiones se entremezcla, siendo más evidente para tipologías con un mayor rango, como TV, al contrario que ocurre para la tipología DS, que con rangos intercuantiles menores, están mucho más concentradas en valores más bajos.

Finalmente, es importante comentar que esta aproximación por barrios, sirve únicamente como aproximación general, ya que desvirtúa en cierta manera los resultados reales de índice de riesgo y tipología HUZ. Esto se debe a que se utilizan promedios para un mismo barrio, pese a que en ese área las tipologías HUZ y valores de riesgo puedan ser notablemente diferentes. De tal forma, este hecho evidencia la necesidad de la aproximación y análisis del índice de riesgo a nivel de edificio y vivienda.



Figura 54. Aproximación mediante promedios de índice de riesgo térmico y tipología HUZ en los barrios de Madrid.

8.3. Conclusiones

Este capítulo se ha centrado en la definición y cálculo del índice de riesgo energético en la ciudad de Madrid y su posible vínculo con las HUZs. Esta estimación busca priorizar viviendas dónde la actuación energética es prioritaria y por tanto en las que se debería facilitar el acceso a las políticas de rehabilitación energética. Las conclusiones que extraen de este capítulo son:

- La definición de riesgo térmico ha permitido la combinación de factores clave para la identificación de viviendas donde la actuación energética es prioritaria mediante la combinación de los parámetros del nivel de exposición y nivel de vulnerabilidad. Con el fin de delimitar el trabajo, la selección de variables se ha acotado a los factores de demanda energética edificatoria y la renta media neta de los hogares, identificados como determinantes.
- El acoplamiento de exposición-vulnerabilidad se ha llevado a cabo mediante una ponderación equitativa y la transformación de variables utilizando el concepto de percentil que permite homogeneizar dichas variables. Este hecho también ha facilitado incluir la demanda de calefacción y refrigeración con los mismos pesos, considerando de esta forma los futuros escenarios climáticos. Además, el cálculo de riesgo energético aplicado a cada edificio de la ciudad se presenta como una gran ventaja, ya que por un lado permite cuantificar el riesgo térmico de las viviendas y por otro, contextualizarlas numéricamente dentro del conjunto de la ciudad.
- El nivel de exposición (combinación de demanda de calefacción y refrigeración) es más notorio en el primer anillo periférico de la ciudad, donde se concentran edificaciones en hilera y bloques de manzana cerrada (CA, DL y SL). En estas zonas también se encuentran altos niveles de vulnerabilidad (bajos niveles de renta). Por el contrario, en cinturón más extremo de la ciudad, correspondiendo con los bloques semiabiertos y viviendas unifamiliares modernas (SC, DS y TR) se observan bajos niveles de exposición y vulnerabilidad.
- De tal forma, de manera promediada para el análisis de la muestra encontramos que el índice de riesgo de las viviendas modernas (TR y DV) y los bloques semiabiertos (SC) tienen bajos índices de exposición y vulnerabilidad, con riesgos mínimos (0,18-0,25). Las viviendas vintage (TV y DV) también presentan riesgos bajos (0,25-0,31). Los bloques históricos (HC) y de Ensanche (HE) tienen exposición baja-media y vulnerabilidad moderada, con índices de riesgo similares (0,41). En contraste, los bloques altos en hilera (DH y SH) tienen riesgos medios (0,47-0,50), mientras que las tipologías bajas en hilera (DL y SL) y los bloques bajos de manzana cerrada (CA) muestran altos niveles de exposición y vulnerabilidad, con riesgos elevados, especialmente SL (0,73).
- El cálculo de índice de riesgo promediado para cada clase HUZ, así como la evaluación de otras variables estadísticas, que incluyen la mediana y rangos intercuartiles ha permitido hacer una aproximación de tipologías HUZs, donde se puede estimar un vínculo entre urbanismo y nivel de riesgo térmico. En línea con esta conclusión, la tipología SL está altamente asociada a altos valores de riesgo térmico, mientras que la clase DS está altamente vinculada a bajos valores de riesgo (bajo

rango intercuartil en ambas). Por el contrario, en tipologías como DV y TV, con un amplio rango intercuartil, este vínculo se desvirtúa, como se ha demostrado en el análisis por barrios.

- El cálculo promedio por HUZ y barrio muestra una imagen aproximada del vínculo tipología e índice, que facilita la comprensión. Los índices de riesgo más altos (0,9-0,6) los encontramos en barrios asociados claramente a la clase SL, con valores máximos en San Cristóbal o Amposta. Aunque de forma más dispersa, también es frecuente riesgos elevados en la tipología CA o DL, en barrios como Pradolongo y Zofío o Campamento y vinateros respectivamente. Con valores medios (0,6-0,2) encontramos los barrios de Pacífico y Delicias (HE), Embajadores y Sol (HC) o Castillejos y La Paz (DH y SH). El riesgo térmico bajo (0,4-0,3) está presente en Rejas y Las Rosas (SC) o Canillas y El Pardo (TV). Finalmente, los niveles de riesgo térmico mínimo (<0,2) están localizado en barrios como Aravaca (TR), Hispanoamérica (DV) y claramente concentrados El plantío o Palomas (DS).
- Cabe destacar que, el uso de promedios por barrio puede distorsionar los resultados, evidenciando la necesidad de analizar el riesgo a nivel de edificio y vivienda para mayor precisión y justificando consecuentemente este trabajo.

9. Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este capítulo se recopila las principales las conclusiones de la investigación, desde el punto de vista de la metodología planteada para la definición de áreas energética prioritarias, como las relativas a los resultados obtenidos a lo largo del proceso.

Además de las conclusiones, se exponen las futuras líneas de investigación destinadas a ampliar y complementar el método agilizando el modelado. Finalmente se presentan los resultados e impacto científico de la investigación.

9.1. Conclusiones del estudio

De manera general, este trabajo da respuesta a la hipótesis planteada y cubre el objetivo principal del trabajo. Por ello, se concluye que es necesario y posible el desarrollo de un método optimizado, pero detallado, que permita identificar áreas de actuación energética prioritaria considerando las tendencias climáticas actuales y futuras a través de la caracterización energética y térmica de Zonas Urbanas Homogéneas (HUZs) y su combinación con factores socioeconómicos.

Asimismo, la identificación del índice de riesgo térmico en los hogares permite definir planes estratégicos de rehabilitación energética justos y adaptados a las necesidades reales de sus hogares. Este hecho facilita alcanzar las hojas de ruta de descarbonización y neutralidad propuestos a largo plazo para la ciudad y consecuentemente reducir el impacto de los escenarios de cambio climático.

9.1.1. Relacionadas con la metodología

De forma desglosada se detallan las siguientes conclusiones relacionadas con la metodología:

- Se han identificado las barreras que dificultan los planes de rehabilitación energética y los retos y oportunidades de la descarbonización residencial. El contexto urbano y climático influye en las condiciones energéticas de las viviendas, por lo que una metodología optimizada para caracterizar los entornos urbanos, considerando las tendencias climáticas actuales, es clave, especialmente en Madrid debido a sus características climáticas, edificatorias y poblacionales.
- El Año Meteorológico Tipo (TMY) definido en base a una campaña experimental a largo plazo en un contexto urbano y el cálculo de sus proyecciones futuras ha sido esencial para la evaluación energética y térmica actual y futura.
- La simulación energética edificatoria desde la perspectiva de bloque de manzana (edificio y entorno próximo) conlleva algunas limitaciones.
 - Las herramientas BEM (*Building Energy Model*), permiten una gran flexibilidad y detalle, pero no tienen en cuenta el contexto urbano. Se fundamentan en arquetipos que se infieren al resto de la urbe a través de una aproximación *bottom-up* utilizando

clasificaciones edificatorias basadas principalmente en el año de construcción, sin considerar detalladamente los parámetros del entorno.

- Por otro lado, las herramientas UBEM (*Urban Building Energy Model*) permiten contextualizar al edificio dentro del entorno construido, usando para su cálculo una aproximación *top-down*. Sin embargo, el nivel de detalle de los parámetros de modelado es más limitado y sus recursos computacionales son elevados para grandes áreas.
- Las HUZs han resuelto eficientemente este aspecto al proponer áreas residenciales representativas que permiten modelar el rendimiento energético de los edificios y extrapolar los resultados a nivel ciudad, optimizando tiempo y recursos. La definición de bloque de manzana urbana ha implicado: a) una aproximación *top-down*, clasificando entornos homogéneos, y b) una aproximación *bottom-up*, caracterizando las edificaciones para evaluar su rendimiento energético dentro de ese entorno.
- La aproximación urbana HUZ (HUZ-pix) se llevó a cabo mediante la superposición de clústers urbanos preexistentes y su cuantificación con indicadores urbanos (cobertura de suelo, morfología y aspectos arquitectónicos) tomando como unidad de análisis el pixel de una malla. A través de herramientas estadísticas y de georrepresentación de datos (GIS) se han validado dichos clústers y se han definido asignado a cada HUZ un rango para cada uno de los indicadores analizados.
- La aproximación edificatoria HUZ (HUZ-Buffer) cambia la unidad de análisis al área de influencia del edificio (buffer), utilizando los límites previos y verificando cómo encajan en las clasificaciones constructivas (HUZ-Cons). Luego, se han identificado y caracterizado para el modelado energético mediante indicadores edificatorios (geométricos, constructivos y de ocupación) los edificios HUZs seleccionados como representativos. Estos se definen como aquellos que pertenecen a la misma clase desde el punto de vista urbano (HUZ-pix), edificatorio (HUZ-Buffer) y constructivo (HUZ-Cons).
- La caracterización energética de los edificios HUZs representativos ha permitido calcular la demanda energética (calefacción y refrigeración), la temperatura interior y el estrés térmico adaptativo (horas e intensidad) por clase, a escala de edificio y por planta, para el clima actual y sus proyecciones futuras. Además, la campaña experimental ha facilitado la comparación de los datos simulados con los reales.
- Los datos urbanos y edificatorios, junto con los resultados de demanda energética y estrés térmico extrapolados a la ciudad y otros valores socioeconómicos han permitido crear una base de datos detallada que facilitan el cálculo del índice de riesgo térmico. Este índice, basado en la exposición (demanda energética) y la vulnerabilidad (renta de los hogares), permite identificar áreas prioritarias para la rehabilitación energética a nivel edificio y contextualizarlo en la ciudad. Además, en algunas clases HUZ se observa un posible vínculo con el riesgo térmico, lo que señala la necesidad de atención especial en estas zonas.
- Las líneas futuras de este estudio surgen principalmente de la necesidad de acotar el estudio, considerando como límites de este trabajo:

- No se han considerado los climas meteorológicos extremos ni las variaciones del microclima urbano dentro de la ciudad, por lo que los resultados obtenidos podrían verse exacerbados en situaciones climáticas extremas como olas de calor.
- El exhaustivo modelado energético muestra ligeras discrepancias frente a los datos monitorizados, consecuencia del uso de parámetros representativos como el clima TMY y los edificios HUZs y destacando la necesidad de revisar las variables normativas relacionados con el comportamiento del usuario en verano.
- El cálculo del índice de riesgo térmico permite una primera evaluación y está diseñado para incluir otros factores intensificadores como el gradiente térmico de la Isla de Calor Urbana (ICU), así como variables relacionadas con la salud o índices socioeconómicos.

9.1.2. Relacionadas con los resultados obtenidos.

Las principales conclusiones detallada por capítulos se describe a continuación:

9.1.2.1. La rehabilitación energética en Europa y España

Las estrategias de ahorro energético en edificación son clave para la descarbonización, especialmente ante el aumento de temperaturas y eventos extremos, como olas de calor, que afectan más a zonas urbanas donde vive el 75% de la población española. Con un parque residencial obsoleto y sólo un 30% de viviendas con aislamiento térmico, el consumo energético se agrava, perjudicando a los colectivos más vulnerables, en un contexto de alta pobreza (27%) y población envejecida.

A pesar de iniciativas como el Pacto Verde Europeo, o a nivel español el PNIEC, el PRTR y la ELP, las tasas de renovación energética siguen siendo extremadamente bajas (1% general, 0.2% de renovaciones profundas para Europa, y no alcanzando los mínimos propuestos en España). Esto se debe a varias barreras entre las que destacan la falta de accesibilidad económica y políticas generalistas que no se adaptan detalladamente las condiciones reales de las viviendas, tanto a nivel climático y energético-térmico, como desde el punto de vista socio económico y la salud.

Estos retos, se presentan como una oportunidad, que más allá de fomentar la neutralidad climática potencian el empleo, la economía verde circular y mejoran la calidad de vida de las personas, siendo esto último especialmente ventajoso para los colectivos vulnerables. La metodología propuesta para este trabajo contribuye a reducir las brechas analizadas identificando áreas de intervención energética prioritarias a escala edificatoria, a través de un análisis energético exhaustivo pero eficaz que considera los escenarios climáticos actuales y futuros.

9.1.2.2. La ciudad de Madrid como caso de estudio

Madrid se presenta como ciudad clave para el estudio. Cuenta con veranos cálidos y secos, intensificándose estas condiciones por el clima urbano y por su condición interior. Además, concentra a más de 3 millones de personas y desigualdades territoriales evidentes.

Su compleja trama urbana y sus características constructivas presentan un gran potencial de ahorro energético. En este sentido, las principales características de su parque urbano y edificatorio son:

- Madrid amurallado (<1900): Se caracteriza por una trama irregular, calles estrechas y edificaciones de baja altura (5 plantas) con materiales tradicionales como ladrillo y madera.
- El Ensanche (1900-1920): Con una planificación más regular, las viviendas de unas 5 plantas incorporan mejoras como muros con cámara de aire y cubiertas planas catalanas.
- Asentamientos no planificados (1920-1940): Áreas de clase trabajadora con construcciones de baja altura, autoconstruidas, sin planificación urbana y con escasas zonas verdes.
- Colonias de "hotelitos" (1920-1940): Viviendas unifamiliares en la periferia del Ensanche, impulsadas por la Ley de Casas Baratas de 1911.
- Autarquía franquista (1940-1960): Zonas de edificación abierta planificadas tras la Guerra Civil, principalmente con bloques de 5 plantas, utilizando materiales limitados y normas de habitabilidad mínimas, basadas en la correcta ventilación de (Orden de 1944).
- Desarrollismo y crisis de los 70 (1960-1980): Construcción masiva promovida por la iniciativa privada, incorporan nuevas estructuras porticadas y el uso de cubiertas planas, a raíz de cambios normativos que limitan la transmitancia térmica (NNTT 1955 y NNTT 1969).
- Democracia y movilización social (1980-2006): Planes urbanos para solucionar la fragmentación de la ciudad, con edificaciones de baja altura en los nuevos ensanches periféricos que por primera vez cuentan con aislamiento térmico obligatorio (NBE-CT-79)
- Liberalismo económico (2006-2020): Expansión urbana con la aprobación del PGOUM de 1977. Las viviendas incluyen las especificaciones del CTE, con mínimos de transmitancia térmica.

La aplicación de la metodología propuesta a la ciudad pretende facilitar la hoja de neutralidad propuesta por la ciudad para el año 2050

9.1.2.3. Tendencias climáticas en un contexto urbano

El análisis de las variables climáticas muestra:

- El clima representativo TMY actualizado muestra una temperatura media anual de 16,7°C, con 8,9°C en invierno y 25,9°C en verano, y valores anuales de 48% de humedad, 1,6 m/s de viento y 397 W/m² de radiación solar.
- En contraste, el clima normativo MET y el ampliamente utilizado IWECC no reflejan adecuadamente las condiciones locales, siendo más fríos que el TMY actual, con temperaturas anuales 3,1°C y 2,3°C menores, respectivamente, pero mayores niveles de humedad (60%) y viento (2,6 m/s).
- Los escenarios futuros SSP proyectan un notable aumento de temperatura, mayor en escenarios más desafiantes y avanzados. Para 2050, se prevé un incremento de 1,5°C a 3,1°C (SSP1-SSP5)

respecto al TMY actual, y para 2080, de 2,3°C a 4,4°C, con medias estivales entre 29,1°C y 32,4°C. La humedad relativa se mantiene estable en 2050 y disminuye ligeramente en 2080.

El análisis de los escenarios climáticos, urbanos y edificatorios permite evaluar de forma preliminar el impacto de los escenarios climáticos estudiados, reflejando:

- Un aumento significativo de las temperaturas extremas y de los días cálidos en el futuro, no sólo en verano, sino también en primavera y ligeramente en otoño. Los días de verano, actualmente 133, subirán entre 21 y 41 para 2050 y 2080, mientras que las noches tropicales, ahora 44, podrían duplicarse en 2050 y alcanzar 100 en 2080. Los días helados desaparecerán.
- Actualmente, el confort térmico exterior, que abarca el 86% de las horas anuales, pero disminuye drásticamente en los escenarios futuros, cayendo al 72% y 67% en 2050 y 2080. En verano, el malestar extremo será predominante, estando también presente en primavera y otoño.
- En términos energéticos, mientras que actualmente los grados día de calefacción (HDD) supera a la de refrigeración (CDD), con una proporción 64-36, se prevé que esta ratio se invierte en el futuro. Para 2080, los CDD representarán el 62% de la demanda energética, encontrando valores también en primavera e indicando un cambio en las necesidades energéticas de las edificaciones urbanas.

9.1.2.4. Zonas Urbanas Homogéneas. Entornos representativos

Este capítulo ha desarrollado un sistema innovador de clasificación urbana basado en Zonas Urbanas Homogéneas (HUZ), que integra características urbanas y edificatorias para analizar el comportamiento energético de los edificios en contextos específicos. Su aplicación ha identificado 12 tipologías representativas para la ciudad de Madrid:

- Áreas de bloques compactos: Edificaciones de finales del siglo XVIII hasta la primera mitad del siglo XIX. Incluyen los Bloques del Casco Histórico (B_HC), con alto valor patrimonial, los Bloques de Ensanche Histórico (B_HE) y los Bloques Colectivos de Manzana Cerrada (B_CA).
- Áreas de edificación abierta: Construcciones de mediados y finales del siglo XIX. Este grupo incluye los Bloques Bajos en Hilera Doble (B_DL) e Hilera Simple (B_SL), que abarcan el 35% de la superficie (32 km²), y los Bloques Altos en Hilera Doble (B_DH) e Hilera Simple/Torres (B_SH).
- Zonas de bloques semiabiertos: Edificaciones colectivas modernas, desarrolladas entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX, representadas por los Bloques de Manzana Semiabiertos (B_SC).
- Áreas de viviendas unifamiliares: Construcciones del primer tercio del siglo XIX y principios del siglo XX. Agrupan las Viviendas Aisladas o Pareadas Vintage y Modernas (H_DV y H_DS) y las Viviendas Adosadas o en Hilera Vintage (H_TV y H_TR).

9.1.2.5. Zonas Urbanas Homogéneas. Edificios representativos

Las clases HUZs identificadas anteriormente, se han evaluado para la caracterización energética edificatoria destacando:

- La tipología de casco histórico (HC) es de manzana cerrada con 5 alturas, gran superficie adiabática, patios pequeños y calles estrechas que limitan la luz solar. Las del Ensanche histórico (HE) son similares, pero con mayor superficie de patios interiores y consecuentemente de envolvente.
- Los bloques de manzana cerrada (CA), de 4 plantas con locales en planta baja, y los bloques bajos en hilera (DL y SL), especialmente el tipo SL por su mayor exposición, comparten sistemas constructivos ineficientes, formados únicamente por 1 pie de ladrillo macizo.
- Los bloques altos en hilera (DH y SH), con mayor altura que los DL y SL, tienen muros de ladrillo con cámara de aire, lo que mejora su transmitancia térmica, pero sus cubiertas planas están en contacto directo con las plantas superiores.
- Los bloques semiabiertos (SC) presentan una estructura de manzana completa con un gran patio interior y cuentan con aislamiento térmico en muros y cubiertas.
- Por último, las viviendas unifamiliares en hilera vintage (TV) son de pequeñas y con gran superficie adiabática, al contrario que las pareadas (DS). Por el contrario, las unifamiliares modernas, (DS y TR), son de mayor tamaño y al igual que SC cuentan con aislamiento térmico en muros y cubiertas.

9.1.2.6. Comportamiento energético-térmico de las viviendas HUZs

A continuación, se detallan las conclusiones clave del análisis energético-térmico de las viviendas HUZs.

Desde el punto de vista de la demanda energética de calefacción y refrigeración se concluye que:

- Las viviendas colectivas HUZ presentan, de media, demandas anuales de calefacción de 72 kWh/m² y refrigeración de 21 kWh/m² para el clima actual TMY. Los climas MET e IWECE sobreestiman la demanda de calefacción en un 60% y subestiman la demanda de refrigeración en un 50%. Se espera una disminución de calefacción del 20-30% para 2050 y 2080 en un escenario continuista (SSP2), mientras que la refrigeración aumentará hasta el 250% en 2080.
- Las propiedades térmicas de la envolvente y la morfología urbana son clave en la evaluación térmica y energética. Los bloques semiabiertos (SC) con aislamiento térmico tienen las menores demandas, mientras que bloques bajos en hilera (SL) las mayores demandas de refrigeración debido a su alta exposición solar y muros ineficientes.
- El análisis por plantas es especialmente importante en edificaciones de poca altura. La calefacción es mayor en las plantas bajas y la refrigeración en las plantas altas. Sin embargo, la distribución de espacios y la morfología influyen en estos patrones. Por ejemplo, los locales comerciales y los espacios bajo cubierta reducen la demanda de calefacción y refrigeración respectivamente.

Considerando los resultados obtenidos en la evaluación del estrés térmico se extrae:

- Actualmente (clima TMY), el estrés por frío afecta al 45% de las horas anuales, especialmente de noviembre a abril, con temperaturas interiores en enero alrededor de 12°C y mayores intensidades

de estrés por frío en la madrugada (5°C). En 2050 (SSP250), las intensidades disminuirán, pero el patrón será similar.

- El estrés por calor ocurre de julio a agosto (7% de las horas), con temperaturas interiores en agosto de 29°C y la mayor intensidad por las tardes (2°C). En 2050, el estrés por calor se extenderá hasta septiembre y la temperatura interior en agosto alcanzará los 34°C, con intensidades de hasta 5°C por las tardes.
- La tipología más afectada por el estrés térmico en la actualidad es SL, especialmente en plantas altas. Sin embargo, en 2050, las diferencias entre tipologías serán menores, excepto en aquellas con aislamiento térmico como ocurre para el caso de SC.

9.1.2.7. Metodología de actuación energética prioritaria

Del análisis del riesgo térmico aplicado a la ciudad de Madrid se concluye:

- Las zonas con mayor riesgo térmico están en el primer anillo periférico, con bloques de manzana cerrada y bajos en hilera (CA, DL, SL), destacando barrios como San Cristóbal o Amposta.
- Las tipologías altas en hilera (DH y SH) tienen valores ligeramente superiores, mientras que el centro de la ciudad presenta viviendas históricas y de Ensanche con valores medios.
- El último anillo de la ciudad muestra los menores índices de riesgo, con bajos niveles de exposición y vulnerabilidad, especialmente en bloques semiabiertos (SC) y viviendas unifamiliares modernas (TR y DS) en barrios como Aravaca o Palomas.
- El análisis por barrio puede distorsionar los resultados, siendo más efectivo y ventajoso evaluar el riesgo a nivel de edificio y vivienda para obtener mayor precisión.

Finalmente se concluye que la metodología propuesta, aplicada a la ciudad de Madrid, pero diseñada para su replicabilidad en otras ciudades, se presenta como una palanca de cambio para abordar los retos energéticos urbanos actuales y futuros de descarbonización. Además, su metodología e información generada también puede ayudar en otros enfoques relacionados con la mitigación y adaptación climática fomentando la regeneración urbana y sostenibilidad.

9.2. Futuros trabajos de investigación

En este apartado se esbozan algunas propuestas que pueden ser de interés en un futuro y con las se pretende seguir avanzando dentro de esta línea de investigación.

Cabe destacar que gran parte de estas ideas futuras están relacionadas con aspectos que ya se han tratado a lo largo del trabajo, pero que, debido a la necesidad de delimitar la presente tesis doctoral, no se han abordado por su gran extensión.

En primer lugar, se pretende analizar cuál sería el comportamiento energético y térmico considerando variaciones climáticas alternativas al TMY experimental utilizado como caso base en el trabajo. Desde

el punto de vista del microclima urbano, resulta interesante evaluar el vínculo entre las HUZs y las diferencias de gradiente térmico dentro de la ciudad. En este sentido la combinación del clima actualizado TMY, y los resultados del trabajo de Modelado Empírico de la Isla de Calor Urbana en Madrid pueden arrojar resultados muy relevantes para mejorar el diseño de estrategias, no solo de rehabilitación energética, sino también de regeneración urbana [273]. Por otro lado, el uso de métodos focalizados en la consideración de climas adversos mediante la metodología Año Meteorológico Extremo (EMY) permite mostrar demandas energéticas o situaciones de estrés térmico, que pese a no ser habituales son esenciales reconocer. Esto es especialmente relevante desde el punto de vista del comportamiento de la red de suministro energético y del sistema de prevención de salud.

Por otro lado, se planea trabajar en la automatización del proceso de validación de la metodología HUZ a través de la programación, así como la búsqueda y estandarización de fuentes de datos en otras ciudades. Relacionado con esta idea, se está colaborando con la red CYTED REDENARQUI para la caracterización de HUZs en ciudades iberoamericanas [358]. Además, a través de la participación en el proyecto europeo LIFE23-CET-OBSERVE, se busca desarrollar y estandarizar protocolos para la recopilación y agregación sistemática de datos relacionados con la edificación [359]. Con la recolección de estos datos también se espera ayudar a las autoridades nacionales a mejorar las políticas energéticas y la toma de decisiones de cara a la neutralidad climática de las ciudades.

Asimismo, para la mejora de la evaluación energética y térmica se está trabajando en el acoplamiento de las HUZs identificadas en la ciudad de Madrid con el software UBEM CityBES desarrollado por el *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) [360]. Con esta herramienta ya se definieron los primeros resultados durante la estancia internacional en el LBNL y se está evaluando el comportamiento de las clases HUZs de Madrid para diversas soluciones de rehabilitación energética. Además, esta aproximación ofrece un gran potencial, puesto que también permite el modelado de sistemas de calefacción y refrigeración de distrito, el análisis de sistemas fotovoltaicos en tejados, la visualización del rendimiento de los edificios, la simulación de la resiliencia térmica, el mapeo a escala urbana del microclima y la vulnerabilidad térmica.

Finalmente, se propone complementar la definición del índice de riesgo térmico considerando, además de los factores determinantes utilizados previamente, otros factores intensificadores relacionados con la exposición y vulnerabilidad. Algunos ejemplos relevantes recogen la consideración del gradiente térmico de la isla de calor urbana (ICU), la edad, el sexo, el nivel de estudios, el régimen de tenencia o el estado de la salud. Para ello, además de la adquisición de datos se quiere explorar en la relevancia que aporta cada uno de ellos, con el fin de asignarles diferentes pesos en el cálculo del índice.

Las aproximaciones planteadas buscan dar continuidad a la línea de trabajo propuesta cuyo fin último es la descarbonización y mejora de la habitabilidad en el sector residencial

9.3. Indicadores de calidad

En este apartado se muestran los resultados científicos y difusión obtenidos durante el trabajo de esta tesis, tanto en revistas científicas, congresos internacionales y capítulos de libro. Además, se detallan las estancias de investigación, la participación en proyectos de investigación competitivos y las comunicaciones en jornadas técnicas o medios de comunicación

9.3.1. Publicaciones en revistas científicas indexadas

- Assessing the impact of climate change on housing thermal comfort: heat stress intensity in Homogeneous Urban Zones**
López-Moreno, H.; Sánchez, M.N.; Giancola E.; Sánchez-Guevara, C.; Neila González, J.; Soutullo S.
Urban Climate (under review UCLIM-D-24-00887). JCR Q1
- Sustainable transformation in the Latin American and Caribbean districts through the implementation of a qualitative methodology. Challenges and key aspects to be addressed**
 Soutullo Castro, S.; Ferrer, J.A.; Seco, O.; López-Moreno, H.; Sánchez, M.N.; Vitale, M.J.; Reyes, A.L.; Correa, E.N; De Diego, L.
Journal of Cleaner Production, vol. 472, p. 143336, Sep. 2024
 doi: [10.1016/J.JCLEPRO.2024.143336](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.143336). JCR Q1
- Visual attention towards building façades in the most energy vulnerable neighbourhoods in Madrid and the relaxing effect of visual coherence**
 Nédée, A.; López-Moreno, H.; Arranz, B.; Higuera, E.
Territorios en formación, no. 21, pp. 1–20, Dec. 2023
 doi: [10.20868/tf.2023.21.5240](https://doi.org/10.20868/tf.2023.21.5240). DOAJ
- On the identification of Homogeneous Urban Zones for the residential buildings' energy evaluation.**
López-Moreno, H.; Núñez-Peiró, M.; Sánchez-Guevara, C.; Neila González, J.
Building and Environment, vol. 207, Jan. 2022.
 doi: [10.1016/j.buildenv.2021.108451](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108451). JCR Q1
- Response of thermal comforts' standards applied to representative building typologies under new climate trends in Madrid.**
López-Moreno, H.; Giancola, E.; Sánchez Egido, M.N.; Soutullo Castro, S.
Innovación Tecnológica y Desarrollo Sostenible en la Edificación. Dykinson. 2022
 ISBN 978-84-1122-850-3. SPI Q1
- Una nueva estrategia integral para modelar materiales urbanos para ciudades térmicamente habitables.**
 Giancola, E.; López-Moreno, H.; Soutullo Castro, S.; Sánchez Egido, M.N.; Zarzalejo Tirado, L.F.; Gamarra, A.; Herrera, I.; Ferrer, J.A.; Naboni, E.
Innovación Tecnológica y Desarrollo Sostenible en la Edificación. Dykinson. 2022
 ISBN 978-84-1122-850-3. SPI Q1

9.3.2. Publicaciones en congresos internacionales

- **Long-term experimental climate data for the energy and thermal comfort evaluation in built environment.**
López-Moreno, H.; Sánchez Egido, M.N.; Navarro Fernández, A.; Zarzalejo Tirado, L.F.; Giancola, E.; Soutullo Castro, S.
9th International Conference on Technological Innovation in Buildings (CITE), Madrid, Spain. 2024.
 ISBN: 978-84-18255-69-4
- **Urban materials for thermally liveable Madrid. A digital twin Strategy to characterize developments.**
 Giancola, E.; López, H.; Soutullo, S.; Sánchez, M.N.; Gamarra, A.; Herrera, I.; Zarzalejo, L.; Naboni, E.
36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA). Santiago de Chile, Chile. 2022
 ISBN: 978-956-14-3069-3
- **Updated climate files in the simulation of residential buildings.**
 Giancola, E.; Sánchez, M.N.; López-Moreno, H.; Ferrer, J.A.; Jiménez, M.J.; Soutullo, S.
17th IBPSA Conference, International Conference of Building Simulation (BS). Bruges, Belgium. 2021.
 doi: [10.26868/25222708.2021.30772](https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30772)
- **Outdoor thermal comfort approach in summer season for the city of Madrid,**
López-Moreno, H.; Soutullo, S.; Sánchez, M. N.; Giancola, E.; Neila González, F.J.; Antonio, J.A.
35th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA). A Coruña, Spain. 2020
<http://hdl.handle.net/2183/26695>
- **Evaluation of weather conditions in urban climate studies over different Madrid neighbourhoods: Influence of urban morphologies on the microclimate.**
López-Moreno, H.; Giancola, E.; Sánchez Egido, M.N.; Ferrer Tevar, J.A.; Soutullo Castro, S.
13th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (EuroSun). 2020
 doi: [10.18086/eurosun.2020.09.03](https://doi.org/10.18086/eurosun.2020.09.03).
- **Mapping Priority Energy Intervention Areas in Birmingham (UK)**
López-Moreno, H.; Prestwood, E.; Wilson, G.; Giancola, E.; Sánchez, M.N.
13th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (EuroSun). 2020.
 doi: [10.18086/eurosun.2020.13.02](https://doi.org/10.18086/eurosun.2020.13.02)

9.3.3. Participación en capítulos de libro

- **Building typologies and Urban Heat Island in Madrid. Urban Heat Island, urban climate and building energy consumption. MODIFICA Project**
 Neila González, F.J.; Sánchez-Guevara Sánchez, C.; Núñez Peiró, M.; Román López, M.E.; López-Moreno, H.; Gómez Muñoz, G.M.; Luxán García de Diego, M.
García Maroto Editores, Madrid. 2020
 ISBN 978-84-17969-87-5.
- **Microclima y confort térmico en diversas zonas urbanas. Impacto del cambio climático en las ciudades**
López-Moreno, H.; Soutullo Castro, S.; Neila González, F.J.

Serie de ponencias, ADOPTA: Nueva Ciencia para nueva energía, 2020.

NIPO: 832-20-014-1

- **Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT: Objetivos, metodología y aplicaciones**

Soutullo, S.; Sánchez, M.N.; Olmedo, R.; López-Moreno, H.; Castellanos, A.; Seco, o.; Enríquez, R.; Heras, M.R.; Jiménez, M.J.

Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética de los edificios. Experiencias en España. 2020

ISBN 9788412276749, págs. 210-220

- **Análisis experimental de entornos urbanos realizados por la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT**

Giancola, E.; Sánchez, M. N.; Olmedo, R.; López-Moreno, H.; Soutullo, S.; Castellanos, A.; Seco, Ó.; Díaz, J. A.; Ferrer Tevar, J. A.; Jiménez, M. J.; Heras, M. R.

Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética de los edificios. Experiencias en España. 2020

ISBN 9788412276749, págs. 298-308

9.3.4. Estancias y formación en centros internacionales

- **Estancia de investigación en Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). California, EEUU.**

Building Technology and Urban Systems Division. Marzo – agosto 2022

Supervisor: Dr. Tianzhen Hong

Financiación en concurrencia competitiva: Programa de movilidad en Investigación en Universidades de América del Norte (PDI) de la Universidad Politécnica de Madrid.

- **Estancia de Investigación en Birmingham University. Birmingham, Reino Unido.**

Birmingham Energy Institute (BEI). Septiembre - noviembre 2019

Supervisor: Dra. Emily Prestwood y Dr. I.A. Grant Willson

Financiación en concurrencia competitiva: Climate KIC. Pioneer into practice 2019

- **Formación en Urban Climate Summer School. Bochum, Alemania.**

Ruhr University Bochum. Septiembre 2022

Financiación en concurrencia competitiva: Young Scientist Conference Award. European Meteorological Society (EMS).

9.3.5. Participación en proyectos de investigación competitivos

- **Proyecto CO2NSTRUCT.** *Modelling the role of circular economy construction value chains for a carbon-neutral Europe.*

Programa europeo de I+D+I: HORIZON-RIA. Climate sciences and responses. 2022-2026

Grant agreement ID: 101056862, CIEMAT. Presupuesto: 450.832 €

- **Proyecto URBAN-TherCOM.** *A novel comprehensive workflow for modelling outdoor thermal comfort and energy demand in urban areas.*

Agencia estatal de investigación. Retos de sociedad 2020. Proyecto coordinado MateMad. 2021-2024

PID2020-114873RA-C33, CIEMAT. Presupuesto: 44.770 €.

- **Proyecto In-Situ_BEPAMAS.** *Building Energy Performance Assessment based on In-Situ Measurement, Analysis and Simulation.*
Agencia estatal de investigación. Retos de sociedad 2019. 2020-2023
PID2019-105046RB-I00, CIEMAT. Presupuesto: 133.100 €
- **Red de Excelencia MONITOR.** *Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética en los edificios.*
Agencia estatal de investigación. Acciones de Dinamización, Redes de excelencia, 2017. 2018-2020.
BIA2017-90912-REDT, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Presupuesto: 4.500 €

9.3.6. Participación en actividades y publicaciones divulgativas

- **El verano se alarga dos meses en Madrid.** *The Conversation*, 2024.
Giancola, E.; López-Moreno, H.; Sánchez Egido, M.N.; Soutullo Castro, S.
<https://theconversation.com/el-verano-se-alarga-dos-meses-en-madrid-233695>
- **Científicas como tú.**
Ponente dentro de las V Jornadas CIEMAT de la Mujer y la Niña en la Ciencia, 2021.
<https://11febrero.ciemat.es/cientificascomotu>
- **Adopta Ciencia, contágate de mí energía.**
Ponente en las jornadas del Comité de Divulgación Científica del CIEMAT, 2020.
<https://www.ciemat.es/cargarAplicacionNoticias.do?texto=adoptaciencia&idArea=0&identificador=1989>
- **V Coloquio de Energía de la Universidad de Chiapas, México.**
Ponente en el Ciclo de Conferencias de Energía, 2020
https://agenda.ciemat.es/event/1922/attachments/1965/2653/QUINTO_COLOQUIO_DE_ENERGIA.pdf
- **Evaluación del confort térmico en diferentes barrios de la ciudad de Madrid.** *Solar News*, 2020
López-Moreno, H.; Soutullo Castro S. Revista especializada Nº 91. 6ºBimestre
<https://www.calameo.com/read/000884165160bf0cbede4>

10. Conclusions and future lines of research

In this chapter, the main conclusions of the research are summarized, focusing both on the methodology proposed for defining priority energy areas and on the results obtained in the process.

In addition to the conclusions, future research lines are presented, aimed at expanding and complementing the method while streamlining the modelling process. Finally, the scientific outcomes and impact of the research are discussed.

10.1. Study conclusions

In general, this work addresses the proposed hypothesis and fulfils the main objective of the study. It is therefore concluded that the development of an optimized, yet detailed method is both necessary and feasible. This method enables the identification of priority energy intervention areas by considering current and future climate trends through the energy and thermal characterization of Homogeneous Urban Zones (HUZs) combined with socioeconomic factors.

Furthermore, identifying the thermal risk index in households allows for the design of fair and tailored strategic energy rehabilitation plans that address the real needs of these households. This approach facilitates achieving long-term decarbonization and neutrality roadmaps for the city, thereby mitigating the impact of climate change scenarios.

10.1.1. Related to the methodology

The following conclusions related to the methodology are detailed:

- Barriers hindering energy retrofitting plans, as well as the challenges and opportunities of residential decarbonization, have been identified. The urban and climatic context significantly influences the energy conditions of housing. Therefore, an optimized methodology to characterize urban environments, considering current climate trends, is crucial, particularly in Madrid, due to its unique climatic, building, and demographic characteristics.
- The definition of the Typical Meteorological Year (TMY) based on a long-term experimental campaign in an urban context, along with the calculation of its future projections, has been essential for assessing current and future energy and thermal performance.
- Building energy simulation from a block-scale perspective (building and its surrounding environment) involves certain limitations:
 - BEM (Building Energy Model) tools provide great flexibility and detail but do not consider the urban context. They rely on archetypes extrapolated to the broader urban area through a bottom-up approach, using building classifications primarily based on construction year, without fully accounting for environmental parameters.

- UBEM (Urban Building Energy Model) tools enable the contextualization of buildings within the built environment, using a top-down approach for calculations. However, the level of detail in modelling parameters is more limited, and computational resources required for large areas are significant.
- The HUZs have effectively addressed this issue by proposing representative residential areas that allow for modelling the energy performance of buildings and extrapolating the results at the city level, optimizing time and resources. The definition of urban city blocks involved: a) a top-down approach, classifying homogeneous environments, and b) a bottom-up approach, characterizing buildings to evaluate their energy performance within that environment.
- The urban HUZ approach (HUZ-pix) was carried out by overlaying pre-existing urban clusters and quantifying them with urban indicators (land cover, morphology, and architectural aspects) using a pixel grid as the unit of analysis. Through statistical tools and georeferenced data (GIS), these clusters were validated, and each HUZ was assigned a range for each of the analysed indicators.
- The building-scale HUZ approach (HUZ-Buffer) changes the unit of analysis to the building's area of influence (buffer), using the previous boundaries and verifying how they align with constructive classifications (HUZ-Cons). Representative buildings for energy modelling were then identified and characterized using building indicators (geometric, constructive, and occupancy). These representative HUZ buildings are defined as those that belong to the same class from the urban (HUZ-pix), building (HUZ-Buffer), and constructive (HUZ-Cons) perspectives.
- The energy characterization of representative HUZ buildings has enabled the calculation of energy demand (heating and cooling), indoor temperatures, and adaptive thermal stress (hours and intensity) by class, at the building and floor levels, for the current climate and its future projections. Additionally, an experimental campaign has allowed the comparison of simulated and actual data.
- The urban and building data, combined with the results for energy demand and thermal stress extrapolated to the city along with socioeconomic factors, have made it possible to create a detailed database. This facilitates the calculation of the thermal risk index. This index, based on exposure (energy demand) and vulnerability (household income), helps identify priority areas for energy rehabilitation at the building level and contextualize them within the city. Moreover, in some HUZ classes, a potential link with thermal risk is observed, highlighting the need for special attention to these areas.
- Future research directions arise primarily from the need to refine the study, considering the following limitations:
 - Extreme meteorological conditions and variations in the urban microclimate within the city have not been considered, meaning the results may be exacerbated under extreme climatic scenarios, such as heat waves.

- The detailed energy modelling reveals slight discrepancies compared to monitored data, resulting from the use of representative parameters like the TMY climate and HUZ buildings. This underscores the need to review normative variables related to user behaviour in summer.
- The calculation of the thermal risk index provides an initial assessment and is designed to incorporate additional intensifying factors, such as the thermal gradient of the Urban Heat Island (UHI), as well as health-related variables or socioeconomic indices.

10.1.2. Results-based conclusions

The key conclusions, detailed by chapters, are as follows:

10.1.2.1. Energy retrofitting in Europe and Spain

Energy-saving strategies in buildings are essential for decarbonization, particularly in light of rising temperatures and extreme events such as heat waves, which disproportionately affect urban areas where 75% of Spain's population resides. With an outdated housing stock and only 30% of homes having thermal insulation, energy consumption worsens, impacting the most vulnerable groups in a context of high poverty rates (27%) and an aging population.

Despite initiatives like the European Green Deal, and at the Spanish level, the PNIEC, PRTR, and ELP, energy renovation rates remain extremely low (1% overall and 0.2% for deep renovations in Europe, with Spain failing to meet proposed minimum targets). This is due to several barriers, notably the lack of financial accessibility and generic policies that do not account for the actual climatic, energy-thermal, socioeconomic, and health-related conditions of buildings.

These challenges are presented as an opportunity that, beyond promoting climate neutrality, enhances employment, the circular green economy, and improves the quality of life for individuals, with the latter being especially advantageous for vulnerable groups. The methodology proposed for this work helps reduce the analysed gaps by identifying priority energy intervention areas at the building scale, through a thorough yet effective energy analysis that considers both current and future climate scenarios.

10.1.2.2. Madrid as a Case Study

Madrid emerges as a key city for this study. It experiences hot, dry summers, conditions exacerbated by its urban climate and inland location. Moreover, it houses over 3 million people and exhibits significant territorial inequalities.

Its complex urban fabric and construction characteristics present substantial energy-saving potential. The main features of its urban and building stock are:

- **Walled Madrid (<1900):** Characterized by an irregular layout, narrow streets, and low-rise buildings (5 stories), using traditional materials like brick and wood.
- **The Ensanche (1900–1920):** Featuring more regular planning, 5-story buildings with improvements such as cavity walls and Catalan flat roofs.
- **Unplanned Settlements (1920–1940):** Working-class areas with low-rise, self-built constructions, lacking urban planning and green spaces.
- **"Hotelitos" Colonies (1920–1940):** Single-family homes on the outskirts of the Ensanche, developed under the Cheap Housing Act of 1911.
- **Francoist Autarky (1940–1960):** Open-plan developments constructed after the Civil War, primarily 5-story blocks, using limited materials and minimal habitability standards, focused on proper ventilation (1944 Ordinance).
- **Developmentalism and the 1970s Crisis (1960–1980):** Mass construction driven by private initiatives, incorporating new framed structures and flat roofs due to regulatory changes limiting thermal transmittance (1955 and 1969 NNTT).
- **Democracy and Social Mobilization (1980–2006):** Urban plans aimed at addressing city fragmentation, with low-rise buildings in new peripheral expansions, which for the first time included mandatory thermal insulation (NBE-CT-79).
- **Economic Liberalism (2006–2020):** Urban expansion following the approval of the 1977 PGOUM. Homes built during this period adhered to the CTE specifications, including minimum thermal transmittance requirements.

The application of the proposed methodology to Madrid aims to support the city's roadmap for achieving climate neutrality by 2050.

10.1.2.3. Climate Trends in an urban context

The analysis of climatic variables shows:

- The updated representative TMY climate shows an annual average temperature of 16.7°C, with 8.9°C in winter and 25.9°C in summer, along with annual values of 48% humidity, 1.6 m/s wind, and 397 W/m² solar radiation.
- In contrast, the normative MET climate and the widely used IWEK do not accurately reflect local conditions, being colder than the current TMY, with annual temperatures 3.1°C and 2.3°C lower, respectively, but higher levels of humidity (60%) and wind (2.6 m/s).
- The future SSP scenarios project a significant temperature increase, greater in more challenging and advanced scenarios. By 2050, a rise of 1.5°C to 3.1°C (SSP1-SSP5) is expected compared to the current TMY, and by 2080, an increase of 2.3°C to 4.4°C, with summer averages between 29.1°C and 32.4°C. Relative humidity remains stable in 2050 and decreases slightly in 2080.

The analysis of climatic, urban, and building scenarios allows a preliminary assessment of the impact of the studied climate scenarios, reflecting:

- A significant increase in extreme temperatures and warm days in the future, not only in summer but also in spring and slightly in autumn. Summer days, currently 133, will rise by 21 to 41 days by 2050 and 2080, while tropical nights, currently 44, could double by 2050 and reach 100 by 2080. Frost days will disappear.
- Currently, outdoor thermal comfort covers 86% of the annual hours but declines drastically in future scenarios, falling to 72% and 67% in 2050 and 2080. In summer, extreme discomfort will become predominant, also present in spring and autumn.
- In energy terms, while heating degree days (HDD) currently exceed cooling degree days (CDD), with a ratio of 64-36, this situation is expected to reverse in the future. By 2080, CDDs will represent 62% of energy demand, with values also rising in spring, indicating a shift in the energy needs of urban buildings.

10.1.2.4. Homogeneous Urban Zones. Representative Environments

This chapter has developed an innovative urban classification system based on Homogeneous Urban Zones (HUZ), which integrates urban and building characteristics to analyse the energy behaviour of buildings in specific contexts. Its application has identified 12 representative typologies for Madrid:

- Compact block areas: Buildings from the late 18th century to the first half of the 19th century. This includes the Historical Centre Blocks (B_HC), with high heritage value, the Historical Expansion Blocks (B_HE), and the Collective Attached Blocks (B_CA).
- Sprawling areas: Buildings from the mid to late 19th century. This group includes the Double Long Blocks (B_DL) and Single Long Blocks (B_SL), covering 35% of the surface area (32 km²), and the High Double Long Blocks (B_DH) and Simple Tower High-rise Blocks (B_SH).
- Semi-sprawling block zones: Modern collective buildings, developed from the late 19th to early 20th century, represented by Semi-open Collective Blocks (B_SC).
- Single-family housing areas: Buildings from the first third of the 20th century and early 20th century. This group includes Vintage and Modern Detached or Semi-detached Houses (H_DV and H_DS) and Vintage Terraced or Row Houses (H_TV and H_TR).

10.1.2.5. Homogeneous Urban Zones. Representative Buildings

The previously identified HUZ classes have been evaluated for building energy characterization:

- The historical centre typology (HC) consists of closed blocks with 5 floors, large adiabatic surfaces, small courtyards, and narrow streets that limit sunlight. The Historic Expansion blocks (HE) are similar but with a larger interior courtyard area and, consequently, more building envelope.

- The collective attached buildings (CA), with 4 floors and commercial spaces on the ground floor, and the long low-blocks (DL and SL), especially the SL type due to its higher exposure and inefficient construction systems, consisting only of a single layer of solid brick.
- The long high-rise blocks (DH and SH) are taller than the DL and SL and have brick walls with an air gap, improving their thermal transmittance. Their flat roofs are in direct contact with the upper floors.
- The semi-open blocks (SC) have a full block structure with a large interior courtyard and thermal insulation in the walls and roofs.
- Finally, the vintage row houses (TV) are small with a large adiabatic surface, in contrast to the semi-detached houses (DS). On the other hand, modern single-family houses (DS and TR) are larger and, like SC, have thermal insulation in walls and roofs.

10.1.2.6. Energy-Thermal Behaviour of HUZ Homes

The key conclusions from the energy-thermal analysis of the HUZ homes are detailed below.

From the perspective of heating and cooling energy demand, the conclusions are as follows:

- HUZ collective homes, on average, show annual heating demands of 72 kWh/m² and annual cooling demands of 21 kWh/m² for the current TMY climate. The MET and IWECC climates overestimate heating demand by 60% and underestimate cooling demand by 50%. A 20-30% reduction in heating demand is expected for 2050 and 2080 in a continuation scenario (SSP2), while cooling demand will increase up to 250% by 2080.
- The thermal properties of the building envelope and urban morphology are key in thermal and energy evaluation. Semi-open blocks (SC) with thermal insulation have the lowest demands, while Simple Long Low-rise Blocks (SL) have the highest cooling demands due to their high solar exposure and inefficient walls.
- The analysis by floor is especially important in low-rise buildings. Heating demand is higher on the ground floors, while cooling demand is higher on the upper floors. However, the distribution of spaces and morphology influence these patterns. For example, commercial spaces and attic areas reduce heating and cooling demand, respectively.

Considering the results obtained in the thermal stress evaluation:

- Currently (TMY climate), cold stress affects 45% of the annual hours, especially from November to April, with indoor temperatures in January around 12°C and higher cold stress intensities in the early morning (5°C). In 2050 (SSP250), the intensities will decrease, but the pattern will remain similar.
- Heat stress occurs from July to August (7% of the hours), with indoor temperatures in August reaching 29°C and the highest intensity in the afternoons (2°C). By 2050, heat stress will extend

until September, and indoor temperatures in August will reach 34°C, with intensities up to 5°C in the afternoons.

- The typology most affected by thermal stress currently is SL, especially on upper floors. However, by 2050, the differences between typologies will be smaller, except for those with thermal insulation, such as SC.

10.1.2.7. Methodology for priority energy action

From the thermal risk analysis applied to the city of Madrid, the following conclusions were drawn:

- The areas with the highest thermal risk are in the first peripheral ring, with closed block layouts and row houses (CA, DL, SL), with neighbourhoods like San Cristóbal and Amposta standing out.
- The higher row house typologies (DH and SH) show slightly higher values, while the city centre features historic and expansion-era housing with medium values.
- The outermost ring of the city shows the lowest risk indices, with lower levels of exposure and vulnerability, especially in semi-open blocks (SC) and modern single-family homes (TR and DS) in neighbourhoods like Aravaca and Palomas.
- Neighbourhood-based analysis may distort the results; evaluating risk at the building and housing level is more effective and advantageous for greater precision.

Finally, it is concluded that the proposed methodology, applied to the city of Madrid but designed for replication in other cities, presents a lever for change to address the current and future urban energy challenges of decarbonization. Furthermore, its methodology and generated information can also contribute to other approaches related to climate mitigation and adaptation, promoting urban regeneration and sustainability.

10.2. Future research work

This section outlines some proposals that may be of interest in the future and aims to continue advancing within this line of research.

It is important to note that many of these future ideas are related to aspects already addressed throughout the work, but which, due to the need to delimit the present doctoral thesis, were not explored in depth due to their broad scope.

First, the goal is to analyse the energy and thermal behaviour considering alternative climate variations to the TMY used as the baseline case in the work. From the perspective of the urban microclimate, it is interesting to assess the link between Homogeneous Urban Zones and the thermal gradient differences within the city. In this regard, combining the updated TMY climate and the results from the Empirical Model of the Urban Heat Island in Madrid could yield highly relevant results to improve the design of strategies, not only for energy retrofitting but also for urban regeneration. On the other

hand, the use of methods focused on considering adverse climates through the Extreme Meteorological Year (EMY) methodology allows for showing energy demands or thermal stress situations that, although not common, are essential to recognize. This is especially relevant from the perspective of the behaviour of the energy supply network and the health prevention system.

Additionally, there are plans to work on automating the validation process of the HUZ methodology through programming, as well as searching for and standardizing data sources in other cities. Related to this idea, there is ongoing collaboration with the CYTED REDENARQUI network for the characterization of HUZs in Ibero-American cities. Moreover, through participation in the European project LIFE23-CET-OBSERVE, the goal is to develop and standardize protocols for the systematic collection and aggregation of data related to buildings. The collection of this data is also expected to help authorities improve energy policies and decision-making towards the cities' climate neutrality.

For improving energy and thermal evaluation, work is underway to integrate the identified HUZs in the city of Madrid with the UBEM CityBES software developed by the Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). This tool already defined initial results during the international stay at LBNL, and the behaviour of Madrid's HUZ classes is being evaluated for various energy rehabilitation solutions. Furthermore, this approach offers great potential, as it also allows for the modelling of district heating and cooling systems, the analysis of rooftop photovoltaic systems, building performance visualization, thermal resilience simulation, urban-scale microclimate mapping, and thermal vulnerability analysis.

Finally, it is proposed to complement the definition of the thermal risk index by considering, in addition to the previously used determining factors, other intensifying factors related to exposure and vulnerability. Some relevant examples include considering the thermal gradient of the urban heat island (UHI), age, gender, education level, tenure status, or health condition. For this, in addition to data acquisition, the relevance of each factor will be explored to assign different weights in the calculation of the index.

The proposed approaches aim to contribute to the larger goals of decarbonization and improving habitability in the residential sector.

10.3. Indicators of quality

This section presents the scientific results and dissemination obtained during the work of this thesis, including publications in scientific journals, international conferences, and book chapters. It also details research stays, participation in competitive research projects, and communications in technical sessions or media outlets.

10.3.1. Publications in indexed scientific journals

- **Assessing the impact of climate change on housing thermal comfort: heat stress intensity in Homogeneous Urban Zones**

López-Moreno, H.; Sánchez, M.N.; Giancola E.; Sánchez-Guevara, C.; Neila González, J.; Soutullo S.

Urban Climate (under review UCLIM-D-24-00887). JCR Q1

- **Sustainable transformation in the Latin American and Caribbean districts through the implementation of a qualitative methodology. Challenges and key aspects to be addressed**
Soutullo Castro, S.; Ferrer, J.A.; Seco, O.; López-Moreno, H.; Sánchez, M.N.; Vitale, M.J.; Reyes, A.L.; Correa, E.N.; De Diego, L.
Journal of Cleaner Production, vol. 472, p. 143336, Sep. 2024
doi: [10.1016/J.CLEPRO.2024.143336](https://doi.org/10.1016/J.CLEPRO.2024.143336). JCR Q1
- **Visual attention towards building façades in the most energy vulnerable neighbourhoods in Madrid and the relaxing effect of visual coherence**
Nédée, A.; López-Moreno, H.; Arranz, B.; Higuera, E.
Territorios en formación, no. 21, pp. 1–20, Dec. 2023
doi: [10.20868/tf.2023.21.5240](https://doi.org/10.20868/tf.2023.21.5240). DOAJ
- **On the identification of Homogeneous Urban Zones for the residential buildings' energy evaluation.**
López-Moreno, H.; Núñez-Peiró, M.; Sánchez-Guevara, C.; Neila González, J.
Building and Environment, vol. 207, Jan. 2022.
doi: [10.1016/j.buildenv.2021.108451](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108451). JCR Q1
- **Response of thermal comforts' standards applied to representative building typologies under new climate trends in Madrid.**
López-Moreno, H.; Giancola, E.; Sánchez Egido, M.N.; Soutullo Castro, S.
Innovación Tecnológica y Desarrollo Sostenible en la Edificación. Dykinson. 2022
ISBN 978-84-1122-850-3. SPI Q1
- **Una nueva estrategia integral para modelar materiales urbanos para ciudades térmicamente habitables.**
Giancola, E.; López-Moreno, H.; Soutullo Castro, S.; Sánchez Egido, M.N.; Zarzalejo Tirado, L.F.; Gamarra, A.; Herrera, I.; Ferrer, J.A.; Naboni, E.
Innovación Tecnológica y Desarrollo Sostenible en la Edificación. Dykinson. 2022
ISBN 978-84-1122-850-3. SPI Q1

10.3.2. Publications in international conferences

- **Long-term experimental climate data for the energy and thermal comfort evaluation in built environment.**
López-Moreno, H.; Sánchez Egido, M.N.; Navarro Fernández, A.; Zarzalejo Tirado, L.F.; Giancola, E.; Soutullo Castro, S.
9th International Conference on Technological Innovation in Buildings (CITE), Madrid, Spain. 2024.
ISBN: 978-84-18255-69-4
- **Urban materials for thermally liveable Madrid. A digital twin Strategy to characterize developments.**
Giancola, E.; López, H.; Soutullo, S.; Sánchez, M.N.; Gamarra, A.; Herrera, I.; Zarzalejo, L.; Naboni, E.
36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA). Santiago de Chile, Chile. 2022
ISBN: 978-956-14-3069-3
- **Updated climate files in the simulation of residential buildings.**

Giancola, E.; Sánchez, M.N.; López-Moreno, H.; Ferrer, J.A.; Jiménez, M.J.; Soutullo, S.
17th IBPSA Conference, International Conference of Building Simulation (BS). Bruges, Belgium. 2021.
 doi: [10.26868/25222708.2021.30772](https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30772)

- **Outdoor thermal comfort approach in summer season for the city of Madrid,**
López-Moreno, H.; Soutullo, S.; Sánchez, M. N.; Giancola, E.; Neila González, F.J.; Antonio, J.A.
35th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA). A Coruña, Spain. 2020
<http://hdl.handle.net/2183/26695>
- **Evaluation of weather conditions in urban climate studies over different Madrid neighbourhoods: Influence of urban morphologies on the microclimate.**
López-Moreno, H.; Giancola, E.; Sánchez Egido, M.N.; Ferrer Tevar, J.A.; Soutullo Castro, S.
13th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (EuroSun). 2020
 doi: [10.18086/eurosun.2020.09.03](https://doi.org/10.18086/eurosun.2020.09.03).
- **Mapping Priority Energy Intervention Areas in Birmingham (UK)**
López-Moreno, H.; Prestwood, E.; Wilson, G.; Giancola, E.; Sánchez, M.N.
13th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (EuroSun). 2020.
 doi: [10.18086/eurosun.2020.13.02](https://doi.org/10.18086/eurosun.2020.13.02)

10.3.3. Participation in book chapters

- **Building typologies and Urban Heat Island in Madrid. Urban Heat Island, urban climate and building energy consumption. MODIFICA Project**
 Neila González, F.J.; Sánchez-Guevara Sánchez, C.; Núñez Peiró, M.; Román López, M.E.; López-Moreno, H.;
 Gómez Muñoz, G.M.; Luxán García de Diego, M.
García Maroto Editores, Madrid. 2020
 ISBN 978-84-17969-87-5.
- **Microclima y confort térmico en diversas zonas urbanas. Impacto del cambio climático en las ciudades**
López-Moreno, H.; Soutullo Castro, S.; Neila González, F.J.
Serie de ponencias, ADOPTA: Nueva Ciencia para nueva energía, 2020.
 NIPO: 832-20-014-1
- **Análisis Experimental de Edificios en la Unidad de I+D UiE3 del CIEMAT: Objetivos, metodología y aplicaciones**
 Soutullo, S.; Sánchez, M.N.; Olmedo, R.; López-Moreno, H.; Castellanos, A.; Seco, o.; Enríquez, R.; Heras, M.R.; Jiménez, M.J.
Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética de los edificios. Experiencias en España. 2020
 ISBN 9788412276749, págs. 210-220
- **Análisis experimental de entornos urbanos realizados por la Unidad de I+D UIE3 del CIEMAT**
 Giancola, E.; Sánchez, M. N.; Olmedo, R.; López-Moreno, H.; Soutullo, S.; Castellanos, A.; Seco, Ó.; Díaz, J. A.; Ferrer Tevar, J. A.; Jiménez, M. J.; Heras, M. R.

Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética de los edificios. Experiencias en España. 2020
ISBN 9788412276749, págs. 298-308

10.3.4. Research stays and training at international centers

- **Research Stay at Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). California, USA**
Building Technology and Urban Systems Division. March – August 2022
Supervisor: Dr. Tianzhen Hong
Competitive Funding: Research Mobility Program in North American Universities (PDI) from the Polytechnic University of Madrid.
- **Research Stay at Birmingham University. Birmingham, United Kingdom**
Birmingham Energy Institute (BEI). September – November 2019
Supervisors: Dr. Emily Prestwood and Dr. I.A. Grant Willson
Competitive Funding: Climate KIC. Pioneer into Practice 2019
- **Training at Urban Climate Summer School. Bochum, Germany**
Ruhr University Bochum. September 2022
Competitive Funding: Young Scientist Conference Award. European Meteorological Society (EMS).

10.3.5. Participation in competitive research projects

- **Project CO2NSTRUCT.** *Modelling the role of circular economy construction value chains for a carbon-neutral Europe*
European program de I+D+I: HORIZON-RIA. Climate sciences and responses. 2022-2026
Grant agreement ID: 101056862, CIEMAT. Budget: 450.832 €
- **Project URBAN-TherCOM.** *A novel comprehensive workflow for modelling outdoor thermal comfort and energy demand in urban areas.*
Agencia estatal de investigación. Retos de sociedad 2020. Coordinate project MateMad. 2021-2024
PID2020-114873RA-C33, CIEMAT. Budget: 44.770 €.
- **Project In-Situ_BEPAMAS.** *Building Energy Performance Assessment based on In-Situ Measurement, Analysis and Simulation.*
Agencia estatal de investigación. Retos de sociedad 2019. 2020-2023
PID2019-105046RB-I00, CIEMAT. Budget 133.100 €
- **Excellence Network MONITOR.** *Monitorización y evaluación de la habitabilidad, calidad del aire y eficiencia energética en los edificios.*
Agencia estatal de investigación. Acciones de Dinamización, Redes de excelencia, 2017. 2018-2020.
BIA2017-90912-REDT, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Budget: 4.500 €

10.3.6. Participation in dissemination activities and publications

- **The summer lasts two extra months in Madrid.** *The Conversation*, 2024.
Giancola, E.; López-Moreno, H.; Sánchez Egido, M.N.; Soutullo Castro, S.
<https://theconversation.com/el-verano-se-alarga-dos-meses-en-madrid-233695>
- **Scientists like you**
Speaker at the V CIEMAT Conference on Women and Girls in Science, 2021.
<https://11febrero.ciemat.es/cientificascomotu>
- **Adopta Ciencia, contágate de mí energía.**
Ponente en las jornadas del Comité de Divulgación Científica del CIEMAT, 2020.
<https://www.ciemat.es/cargarAplicacionNoticias.do?texto=adopta+ciencia&idArea=0&identificador=1989>
- **V Coloquio de Energía de la Universidad de Chiapas, México.**
Speaker at the Energy Conference Series, 2020
https://agenda.ciemat.es/event/1922/attachments/1965/2653/QUINTO_COLOQUIO_DE_ENERGIA.pdf
- **Evaluation of thermal comfort in different neighborhoods of the city of Madrid.** *Solar News*, 2020
López-Moreno, H.; Soutullo Castro S. Revista especializada Nº 91. 6ºBimestre
<https://www.calameo.com/read/000884165160bf0cbede4>

Referencias bibliográficas

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Mitigation of Climate Change," 2022. [Online]. Available: www.ipcc.ch
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, "Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2023-2030)," 2024.
- [3] "Comunicación de la Comisión al Parlamento. Oleada de renovación para Europa: ecologizar nuestros edificios, crear empleo y mejorar vidas."
- [4] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España," 2020.
- [5] U. Nations, "Agenda 2030. Sustainable Development – 17 Goals to Transform Our World." Accessed: May 25, 2020. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org>
- [6] European Commission, "The European Green Deal," 2019. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [7] IDAE.Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, "Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica," 2014.
- [8] Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, "Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2021-2030)," 2021.
- [9] Diario Oficial de la Unión Europea, "DIRECTIVA 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética," 2012.
- [10] Agencia Internacional de la Energía, "ENERGY EFFICIENCY 2014 Market Trends and Medium-Term Prospects Market Report." [Online]. Available: <http://www.iea.org/termsandconditionsuseandcopyright/>
- [11] IPCC, "International Panel of Climate Change, 2018: Global Warming of 1.5°C," *United Union*, 2018.
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), "Annual 2022 Global Climate Report | National Centers for Environmental Information (NCEI)." Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>
- [13] R. K. P. and L. A. Meyer, "IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report," Geneva, 2014. doi: 10.1017/CBO9781139177245.003.

- [14] Z. Xu, G. FitzGerald, Y. Guo, B. Jalaludin, and S. Tong, "Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis," Apr. 01, 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.envint.2016.02.007.
- [15] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," 2021.
- [16] C. Giannakopoulos, P. Le Sager, M. Bindi, M. Moriondo, E. Kostopoulou, and C. M. Goodess, "Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming," *Glob Planet Change*, vol. 68, no. 3, pp. 209–224, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001.
- [17] M. Hatzaki, H. A. Flocas, C. Giannakopoulos, and P. Maheras, "The impact of the eastern Mediterranean teleconnection pattern on the Mediterranean climate," *J Clim*, vol. 22, no. 4, pp. 977–992, 2009, doi: 10.1175/2008JCLI2519.1.
- [18] S. E. Perkins-Kirkpatrick and S. C. Lewis, "Increasing trends in regional heatwaves," *Nat Commun*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16970-7.
- [19] Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMAT), "Informe del estado del clima en España en 2022," 2023. doi: 10.31978/666-23-003-8.
- [20] Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMET), "Informe sobre el estado del clima de España 2023," Agencia Estatal de Meteorología, 2024. doi: 10.31978/666-24-003-2.
- [21] Oke T.R., *Boundary Layer Climates*. 1988.
- [22] M. Palme and A. Salvati, "Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies," *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-65421-4.
- [23] Oke T.R., "The energetic basis of the urban heat island," *Royal Meteorological Society*, vol. 108, 1982.
- [24] M. Núñez Peiró, C. Sánchez-Guevara Sánchez, and F. J. Neila González, "Source area definition for local climate zones studies. A systematic review," *Build Environ*, vol. 148, no. October 2018, pp. 258–285, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.10.050.
- [25] J. Mao, J. H. Yang, A. Afshari, and L. K. Norford, "Global sensitivity analysis of an urban microclimate system under uncertainty: Design and case study," *Build Environ*, vol. 124, pp. 153–170, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.011.
- [26] J. Ching *et al.*, "WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene," *Bull Am Meteorol Soc*, vol. 99, no. 9, pp. 1907–1924, Sep. 2018, doi: 10.1175/BAMS-D-16-0236.1.
- [27] "Climate | European Environment Agency's home page." Accessed: Oct. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/at-a-glance/climate>

- [28] “Urban Adaptation Map Viewer.” Accessed: Oct. 10, 2024. [Online]. Available: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/tools/urban-adaptation>
- [29] E. Elnagar, S. Gendebien, E. Georges, U. Berardi, S. Doutreloup, and V. Lemort, “Framework to assess climate change impact on heating and cooling energy demands in building stock: A case study of Belgium in 2050 and 2100,” *Energy Build*, vol. 298, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113547.
- [30] V. Pérez-Andreu, C. Aparicio-Fernández, A. Martínez-Ibernón, and J. L. Vivancos, “Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate,” *Energy*, vol. 165, pp. 63–74, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.015.
- [31] C. Díaz-López, J. Jódar, K. Verichev, M. L. Rodríguez, M. Carpio, and M. Zamorano, “Dynamics of changes in climate zones and building energy demand. A case study in Spain,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/app11094261.
- [32] M. Gangolells and M. Casals, “Resilience to increasing temperatures: Residential building stock adaptation through codes and standards,” *Building Research and Information*, vol. 40, no. 6, pp. 645–664, Dec. 2012, doi: 10.1080/09613218.2012.698069.
- [33] S. Amin, E. Giancola, S. Soutullo, L. Zarzalejo, and R. Em-, “Evaluating the Impact of Climate Change & UHI on Energy Demand of a vulnerable neighborhood in Madrid,” in *5th Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI)*, Rede, Italy, 2023.
- [34] The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, “IPCC, 2021: Summary for Policymakers,” Cambridge University Press, Jul. 2023. doi: 10.1017/9781009157896.001.
- [35] Climate-ADAPT, “Overview list of all indices.” Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/european-climate-data-explorer/overview-list>
- [36] “Home European Climate Assessment & Dataset.” Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecad.eu/>
- [37] D. Lai *et al.*, “A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces,” Nov. 10, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140092.
- [38] “EU Building Stock Observatory.” Accessed: Sep. 12, 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-building-stock-observatory_en
- [39] “INEbase / Demografía y población / Cifras de población y Censos demográficos / Encuesta continua de hogares / Últimos datos.” Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available:

- https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176952&menu=ultiDatos&idp=1254735572981
- [40] International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2017 - Executive Summary*. 2017.
 - [41] “Database - Eurostat.” Accessed: May 07, 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
 - [42] “World Urbanization Prospects : The 2018 Revision,” 2018.
 - [43] “Urban-rural Europe - introduction - Statistics Explained.” Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Urban-rural_Europe_-_introduction
 - [44] “Consumo por usos residencial.” Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/informe.php>
 - [45] “Statistics | Eurostat.” Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/TEN00117>
 - [46] I. Balteanu and F. Viani, “La dependencia energética de la Unión Europea y de España,” *Boletín Económico*, no. 2023/T3, Jun. 2023, doi: 10.53479/30252.
 - [47] S. Soutullo, E. Giancola, M. J. Jiménez, J. A. Ferrer, and M. N. Sánchez, “How climate trends impact on the thermal performance of a typical residential building in Madrid,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13010237.
 - [48] M. J. OrtizBeviá, G. Sánchez-López, F. J. Alvarez-García, and A. RuizdeElvira, “Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability,” *Glob Planet Change*, vol. 92–93, pp. 236–247, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.05.023.
 - [49] “Raising summer energy poverty awareness to reduce cooling needs | COOLTORISE Project | Fact Sheet | H2020 | CORDIS | European Commission.” Accessed: Dec. 23, 2021. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101032823>
 - [50] B. Tremeac *et al.*, “Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures,” *Appl Energy*, vol. 95, pp. 102–110, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.02.015.
 - [51] X. Kan, L. Reichenberg, and F. Hedenus, “The impacts of the electricity demand pattern on electricity system cost and the electricity supply mix: A comprehensive modeling analysis for Europe,” *Energy*, vol. 235, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121329.
 - [52] J. A. López-Bueno *et al.*, “The impact of heat waves on daily mortality in districts in Madrid: The effect of sociodemographic factors,” *Environ Res*, vol. 190, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109993.

- [53] E. Weir, "Heat wave: first, protect the vulnerable.," *CMAJ*, vol. 167, no. 2, p. 169, 2002.
- [54] ILO, "Working on a warmer planet. The impact of heat stress on labour productivity and decent work," *International Labour Office*, 2019.
- [55] C. De Munck *et al.*, "How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?," *International Journal of Climatology*, vol. 33, no. 1, pp. 210–227, 2013, doi: 10.1002/joc.3415.
- [56] "Heat threatens health: key figures for Europe." Accessed: Dec. 09, 2021. [Online]. Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/Climate-change/archive/heat-threatens-health-key-figures-for-europe>
- [57] M. Scortichini, M. de Sario, F. K. De'donato, M. Davoli, P. Michelozzi, and M. Stafoggia, "Short-term effects of heat on mortality and effect modification by air pollution in 25 italian cities," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 15, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.3390/ijerph15081771.
- [58] "EU statistics on income and living conditions - Eurostat." Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/microdata/european-union-statistics-on-income-and-living-conditions>
- [59] The Lancet, "Heatwaves and health," *The Lancet*, vol. 392, no. 10145, p. 359, 2018, doi: 10.1016/S0140-6736(18)30434-3.
- [60] C. Sanchez-Guevara, M. Núñez Peiró, J. Taylor, A. Mavrogianni, and J. Neila González, "Assessing population vulnerability towards summer energy poverty: Case studies of Madrid and London," *Energy Build*, vol. 190, no. February, pp. 132–143, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.024.
- [61] European Environment Agency, "Climate change, impacts and vulnerability in Europe in 2012. An indicator-based report," 2012.
- [62] J. Ballester *et al.*, "Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022," *Nature Medicine* 29:7, vol. 29, no. 7, pp. 1857–1866, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41591-023-02419-z.
- [63] "Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention," 2021, Accessed: Oct. 09, 2024. [Online]. Available: <http://apps.who.int/bookorders>.
- [64] H. Ritchie and M. Roser, "How many people die from extreme temperatures, and how this could change in the future: Part one," *Our World in Data*, Jun. 2024, Accessed: Oct. 09, 2024. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future>
- [65] "IMPACTOS Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA", Accessed: Oct. 09, 2024. [Online]. Available: www.miteco.es

- [66] A. Gasparrini, Y. Guo, and M. Hashizume, "Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study," *Environnement, Risques et Sante*, vol. 14, no. 6, pp. 464–465, 2015, doi: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.
- [67] J. Díaz *et al.*, "Will there be cold-related mortality in Spain over the 2021–2050 and 2051–2100 time horizons despite the increase in temperatures as a consequence of climate change?," *Environ Res*, vol. 176, p. 108557, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ENVRES.2019.108557.
- [68] F. Sartor, R. Snacken, C. Demuth, and D. Walckiers, "Temperature, Ambient Ozone Levels, and Mortality during Summer, 1994, in Belgium," *Environ Res*, vol. 70, no. 2, pp. 105–113, 1995, doi: <https://doi.org/10.1006/enrs.1995.1054>.
- [69] "Cambio Global España 2020/50. Cambio climático y salud," 2012. [Online]. Available: http://www.oscc.gob.es/docs/documentos/Informe_Salud_y_Cambio_Climatico.pdf
- [70] J. M. Robine *et al.*, "Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003," *C R Biol*, vol. 331, no. 2, pp. 171–178, Feb. 2008, doi: 10.1016/J.CRVI.2007.12.001.
- [71] C. Linares Gil, R. Carmona, C. Ortiz, I. J. Mirón Pérez, and J. Díaz Jiménez, "Temperaturas extremas y salud en España en un contexto de cambio climático: algunas líneas de investigación," *Rev Salud Ambient*, vol. 17, no. 1, pp. 57–69, 2017.
- [72] A. Casanueva *et al.*, "Overview of Existing Heat-Health Warning Systems in Europe," *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019, Vol. 16, Page 2657, vol. 16, no. 15, p. 2657, Jul. 2019, doi: 10.3390/IJERPH16152657.
- [73] C. Liu, Z. Yavar, and Q. Sun, "Cardiovascular response to thermoregulatory challenges," *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, vol. 309, no. 11, pp. H1793–H1812, 2015, doi: 10.1152/AJPHEART.00199.2015/ASSET/IMAGES/LARGE/ZH40211517280004.JPEG.
- [74] H. Achebak, D. Devolder, and J. Ballester, "Heat-related mortality trends under recent climate warming in Spain: A 36-year observational study," *PLoS Med*, vol. 15, no. 7, p. e1002617, Jul. 2018, doi: 10.1371/JOURNAL.PMED.1002617.
- [75] A. Saucy *et al.*, "The role of extreme temperature in cause-specific acute cardiovascular mortality in Switzerland: A case-crossover study," *Science of The Total Environment*, vol. 790, p. 147958, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.147958.
- [76] C. Borrell *et al.*, "Socioeconomic position and excess mortality during the heat wave of 2003 in Barcelona", doi: 10.1007/s10654-006-9047-4.
- [77] C. Sánchez-Guevara *et al.*, "Feminisation of energy poverty in the city of Madrid."
- [78] Diario de las Comunidades Europeas, *Acta Única Europea (L 169/2)*. 1987.
- [79] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, "Protocolo de Kioto," 1997.

- [80] Intergovernmental Panel on Climate Change, "IPCC Second Assessment Climate Change report," 1995.
- [81] "Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios," no. 2, p. 76, 2002.
- [82] "Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos," 2006.
- [83] "Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables," 2009.
- [84] "Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios," 2010.
- [85] *Comunicación de la Comisión. Plan de Eficiencia Energética 2011*. 2011.
- [86] "Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética," 2012.
- [87] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, "Acuerdo de París," 2015.
- [88] "Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible." Accessed: Oct. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [89] *Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética*. 2018.
- [90] "Directiva (UE) 2018/ 2001 del parlamento Europeo y del consejo - de 11 de diciembre de 2018 - relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables," 2018.
- [91] "Directiva (UE) 2018/ 2002 del Parlamento Europeo y del Consejo - de 11 de diciembre de 2018," 2018.
- [92] "The European Green Deal - European Commission." Accessed: Oct. 11, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [93] "Fit for 55 - The EU's plan for a green transition - Consilium." Accessed: Oct. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55/>
- [94] "Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática," 2021.

- [95] “Reglamento (UE) 2023/956 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece un Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono,” 2023.
- [96] “New European Bauhaus: beautiful, sustainable, together. - European Union.” Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en
- [97] “Homepage | BUILD UP.” Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://build-up.ec.europa.eu/en/home>
- [98] “Comunicación de la Comisión. El momento de Europa: reparar los daños y preparar el futuro para la próxima generación,” 2020.
- [99] “Comunicación de la Comisión. Plan REPowerEU,” 2022.
- [100] E. Y. Parlamento Europeo El Consejo De, “Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios, (refundición), (Texto pertinente a efectos del EEE).” [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- [101] Ministerio de Economía, “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012,” 2003.
- [102] Ministerio de la Vivienda, “RD 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.,” 2006.
- [103] Ministerio de la Vivienda, *RD 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación.* 1977.
- [104] Ministerio de la Presidencia, *RD 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.* 2007.
- [105] Ministerio de la Presidencia, “RD 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.,” 2007.
- [106] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012,” 2008.
- [107] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “2º Plan de Acción Nacional de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020,” 2011.
- [108] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.,” 2013.
- [109] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, aprobado por Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio.,” 2013.

- [110] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 1826/2009, de 27 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, aprobado por Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio.” 2009.
- [111] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.”
- [112] Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, “Procedimientos para la certificación de edificios.” Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/certificacion-energetica/documentos-reconocidos/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.html>
- [113] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas.” 2013.
- [114] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020 | Idae.” Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/plan-nacional-de-accion-de-eficiencia-energetica-2017-2020>
- [115] Ministerio de Fomento, “Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España,” 2014.
- [116] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.” [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [117] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.” 2022. [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [118] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.” 2021. [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [119] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.”
- [120] Gobierno de España, “Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia (PRTR)”.
- [121] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Real Decreto 853/2021, de 5 de octubre, por el que se regulan los programas de ayuda en materia de rehabilitación residencial y vivienda social del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.” 2021. [Online]. Available: <https://www.boe.es>

- [122] Boletín Oficial del Estado (BOE), “RD 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas, 2013-2016.”.
- [123] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Resolución de 28 de abril de 2015, del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía, por la que se publica la Resolución de 24 de marzo de 2015, del Consejo de Administración, por la que se modifican las bases reguladoras y convocatoria del programa de ayudas para la rehabilitación energética de edificios existentes del sector residencial (uso vivienda y hotelero).,” 2015.
- [124] Boletín Oficial del Estado (BOE), “Resolución de 21 de diciembre de 2017 de la Dirección General del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía por la que se establece la Segunda Convocatoria del Programa de Ayudas para actuaciones de rehabilitación energética de edificios existentes (PAREER II).,” 2017. [Online]. Available: <http://www.boe.es>
- [125] Boletín Oficial del Estado (BOE), “RD 737/2020, de 4 de agosto, por el que se regula el programa de ayudas para actuaciones de rehabilitación energética en edificios existentes y se regula la concesión directa de las ayudas de este programa a las comunidades autónomas y ciudades de Ceuta y Melilla.” 2020. [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [126] Boletín Oficial del Estado (BOE), “RD 691/2021, de 3 de agosto, por el que se regulan las subvenciones a otorgar a actuaciones de rehabilitación energética en edificios existentes, en ejecución del Programa de rehabilitación energética para edificios existentes en municipios de reto demográfico (Programa PREE 5000),” 2021. [Online]. Available: <https://www.boe.es>
- [127] M. y A. U. Ministerio de Transportes, “ERESEE 2020. Actualización 2020 de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España”.
- [128] “Home | FEMA.gov.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fema.gov/>
- [129] “ISO - ISO 31000 — Risk management.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/iso-31000-risk-management.html>
- [130] “Tools | Building Technology and Urban Systems.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://buildings.lbl.gov/urban-science/tools>
- [131] H. López-Moreno, S. Soutullo Castro, and Fco. J. Neila González, “Microclima y confort térmico en diversas zonas urbanas. Impacto del cambio climático en las ciudades.” in *Serie de ponencias, ADOPTA: Nueva Ciencia para nueva energía*, 2020.
- [132] C. Linares, “Cambio Climático y Salud: Impacto de olas de calor y de frío.” [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/respuestas-desde-la-educacion-y-la-comunicacion-al-cambio-climatico/2-cristina-linares-cc-salud_tcm30-486764.pdf

- [133] I. Hall, R. Prairie, H. Anderson, and E. Boes, "Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations. SAND78-1601," Albuquerque, 1978.
- [134] W. Marion and K. Urban, "User's Manual for Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base D&TAIBUTION OF THfs DOCUMENT IS UNLIMITED," 1961.
- [135] S. Wilcox and W. Marion, "Innovation for Our Energy Future Users Manual for TMY3 Data Sets," 1994. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [136] AENOR - Asociación Española de Normativay Certificación, "Datos horarios para la evaluación de la energía anual utilizada en calefacción y refrigeración, Madrid: AENOR, 2011," 2011. [Online]. Available: www.aenor.es Tel.:902 Fax:913
- [137] R. S. J. Finkelstein, "Improved Goodness-Of-Fit Tests," *Biometrika Trust(Oxford University Press)*, vol. 58, no. 3, pp. 641–645, Dec. 1971.
- [138] "ISO 15927. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data.," 2006.
- [139] L. Zarzalejo, F. Tellez, E. Palomo del Barrio, and M. R. Heras, "Creation of Typical Meteorological Years (TMY) for Southern Spanish cities," in *International Symposium Passive Cooling of Buildings*, Jun. 1995.
- [140] S. Soutullo, M. N. Sánchez, R. Enríquez, M. J. Jimenez, and M. R. Heras, "Empirical estimation of the climatic representativeness in two different areas: Desert and Mediterranean climates," *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 829–834, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.415.
- [141] EnergyPlus, "Weather Data Sources | EnergyPlus." Accessed: Aug. 30, 2020. [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather/sources>
- [142] "Source Weather Data Formats: Auxiliary Programs — EnergyPlus 8.3." Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/auxiliary-programs/source-weather-data-formats.html#spanish-weather-for-energy-calculations-swec>
- [143] "ASHRAE International Weather Files for Energy Calculations 2.0 (IWEC2)." Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-international-weather-files-for-energy-calculations-2-0-iwec2>
- [144] Código Técnico de la Edificación (CTE), "CTE-DB-HE-0-Climas de referencia," 2017.
- [145] M. Herrera *et al.*, "A review of current and future weather data for building simulation," *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 602–627, 2017, doi: 10.1177/0143624417705937.
- [146] D. Burillo, M. V. Chester, S. Pincetl, E. D. Fournier, and J. Reyna, "Forecasting peak electricity demand for Los Angeles considering higher air temperatures due to climate change," *Appl Energy*, vol. 236, no. July 2018, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.039.

- [147] CTE, “Índice Objeto Clima de referencia Climats de referencia en soporte informático (MET),” *Código Técnico de la Edificación (Spain)*, pp. 1–7, 2015.
- [148] C. Bianchi and A. D. Smith, “Localized Actual Meteorological Year File Creator (LAF): A tool for using locally observed weather data in building energy simulations,” *SoftwareX*, vol. 10, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.softx.2019.100299.
- [149] M. N. Sánchez, S. Soutullo, R. Olmedo, D. Bravo, S. Castaño, and M. J. Jiménez, “An experimental methodology to assess the climate impact on the energy performance of buildings: A ten-year evaluation in temperate and cold desert areas,” *Appl Energy*, vol. 264, no. February, p. 114730, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114730.
- [150] M. Herrera *et al.*, “A Review of Current and Future Weather Data for Building Simulation,” *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 38, Nov. 2017, doi: 10.1177/0143624417705937.
- [151] S. Soutullo, E. Giancola, M. J. Jiménez, J. A. Ferrer, and M. N. Sánchez, “How climate trends impact on the thermal performance of a typical residential building in Madrid,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 1, p. 0237, 2020, doi: 10.3390/en13010237.
- [152] U. N. H. S. Programme, “Unpacking the Value of Sustainable Urbanization. World Cities Report 2020,” pp. 43–74, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.18356/c41ab67e-en>.
- [153] G. Tardioli, R. Kerrigan, M. Oates, J. O’Donnell, and D. P. Finn, “Identification of representative buildings and building groups in urban datasets using a novel pre-processing, classification, clustering and predictive modelling approach,” *Build Environ*, vol. 140, no. February, pp. 90–106, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.035.
- [154] X. Li *et al.*, “Identifying key determinants for building energy analysis from urban building datasets,” *Build Environ*, vol. 181, no. May, p. 107114, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107114.
- [155] M. Núñez-Peiró, C. Sánchez-Guevara Sánchez, and F. J. Neila González, “Hourly evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones. The case of Madrid”.
- [156] F. Ali-Toudert, “Exploration of the thermal behaviour and energy balance of urban canyons in relation to their geometrical and constructive properties,” *Build Environ*, vol. 188, no. October 2020, p. 107466, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107466.
- [157] E. Naboni, A. Milella, R. Vadalà, and F. Fiorito, “On the localised climate change mitigation potential of building facades,” *Energy Build*, vol. 224, p. 110284, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110284.
- [158] “Impacts on Health of Climate C hange Executive summary INFORMES, ESTUDIOS E INVESTIGACIÓN 2013 MINISTERIO DE SANIDAD, SERVICIOS SOCIALES E IGUALDAD.”

- [159] H. López-Moreno, S. Silvia, M. N. Sánchez, G. Emanuela, N. F. Javier, and F. J. Antonio, "Outdoor thermal comfort approach in summer season for the city of Madrid," in *PLEA 2020 Congress*, 2020.
- [160] H. López Moreno, E. Giancola, M. N. Sánchez Egido, J. A. Ferrer Tevar, and S. Soutullo Castro, "Evaluation of weather conditions in urban climate studies over different Madrid neighbourhoods: Influence of urban morphologies on the microclimate," *International Solar Energy Society (ISES)*, Dec. 2021, pp. 1–12. doi: 10.18086/eurosun.2020.09.03.
- [161] Helena López Moreno, Emanuela Giancola, M. Nuria Sánchez Egido, and Silvia Soutullo Castro, "Response of thermal comfort standards' applied to representative building typologies under new climate trends in Madrid," in *Innovación Tecnológica y Desarrollo Sostenible en la Edificación. Dykinson.*, 2022.
- [162] J. Sokol, C. Cerezo Davila, and C. F. Reinhart, "Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models," *Energy Build*, vol. 134, pp. 11–24, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.10.050.
- [163] S. Soutullo *et al.*, "Methodology for Quantifying the Energy Saving Potentials Combining Building Retrofitting, Solar Thermal Energy and Geothermal Resources," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 22, p. 5970, 2020, doi: 10.3390/en13225970.
- [164] T. Hong, Y. Xu, K. Sun, W. Zhang, X. Luo, and B. Hooper, "Urban Climate Urban microclimate and its impact on building performance : A case study of San Francisco," *Urban Clim*, vol. 68, no. March, p. 100871, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100871>.
- [165] M. Alberti, "The Effects of Urban Patterns on Ecosystem Function," *Int Reg Sci Rev*, vol. 28, no. 2, pp. 168–192, 2005, doi: 10.1177/0160017605275160.
- [166] W. Tian, C. Zhu, Y. Sun, Z. Li, and B. Yin, "Energy characteristics of urban buildings: Assessment by machine learning," *Build Simul*, 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0608-3.
- [167] E. G. Dascalaki, K. G. Droutsas, C. A. Balaras, and S. Kontoyiannidis, "Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock," *Energy Build*, vol. 43, no. 12, pp. 3400–3409, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.002.
- [168] "EU Building Stock Observatory | Energy." Accessed: Apr. 13, 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-bso_en#the-database
- [169] C. Amoah-antwi, J. Kwiatkowska-malina, F. Steven, O. Fenton, G. Malina, and E. Szara, "Italian prototype building models for urban scale building performance simulation," *Science of the Total Environment*, p. 137852, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107590.

- [170] "World Urban Database – World Urban Database and Access Portal Tools." Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: <http://www.wudapt.org/>
- [171] S. Soutullo, C. Directoras, M. Cruz De Andrés, G. M^a, D. Rosario, and H. Celemín, "Evaluación teórica y experimental de una torre de viento evaporativa para acondicionamiento térmico de espacios abiertos," 2012.
- [172] S. Daniel, D. Bienvenido-huertas, and J. A. Pulido-arcas, "applied sciences Analysis of Energy Consumption in Different European Cities : The Adaptive Comfort Control Implemented Model (ACCIM) Considering Representative Concentration Pathways (RCP) Scenarios," pp. 1–24, 2020.
- [173] C. Sánchez-Guevara Sánchez, A. Mavrogianni, and F. J. Neila González, "On the minimal thermal habitability conditions in low income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty," *Build Environ*, vol. 114, pp. 344–356, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.029.
- [174] S. Zare, N. Hasheminejad, H. E. Shirvan, R. Hemmatjo, K. Sarebanzadeh, and S. Ahmadi, "Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year," *Weather Clim Extrem*, 2018, doi: 10.1016/j.wace.2018.01.004.
- [175] R. J. de Dear and G. S. Brager, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference," *ASHRAE Trans*, vol. 104, no. Pt 1A, pp. 145–167, 1998.
- [176] Z. Liu, J. Li, and T. Xi, "A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/buildings13123050.
- [177] T. Honjo, "Thermal Comfort in Outdoor Environment," *Global Environmental Research* 13, no. January 2009, pp. 43–47, 2009.
- [178] A. Pérez Cueva, F. Gómez Lopera, and J. Tornero, "Ciudad y confort ambiental: estado de la cuestión y aportaciones recientes," *Cuadernos de geografía*, no. 80, pp. 147–182, 2006.
- [179] F. A. Toudert, "Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate," *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr.15*, vol. Nr. 15, no. 15, 2005, doi: ISSN 1435-618X.
- [180] D. Fröhlich and A. Matzarakis, "SkyHelios - A model for the rapid calculation of spatially resolved micro scale climate factors," 2018.
- [181] EHS, "English Housing Survey. Data on energy inefficient dwellings." Accessed: Aug. 29, 2020. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/energy-inefficient-dwellings>

- [182] J. Hills, "Getting the measure of fuel poverty Final Report of the Fuel Poverty Review Hills Review Fuel Poverty Hills Review Fuel Poverty," 2012.
- [183] J. D. Healy and J. Peter Clinch, "Fuel poverty, thermal comfort and occupancy: results of a national household-survey in Ireland," *Appl Energy*, vol. 73, no. 3–4, pp. 329–343, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0306-2619(02)00115-0.
- [184] J. D. Healy, J. P. Clinch, J. D. Healy, and J. P. Clinch, "Quantifying the severity of fuel poverty, its relationship with poor housing and reasons for non-investment in energy-saving measures in Ireland," *Energy Policy*, vol. 32, no. 2, pp. 207–220, 2004, Accessed: Nov. 19, 2024. [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:enepol:v:32:y:2004:i:2:p:207-220>
- [185] "EU statistics on income and living conditions (EU-SILC) methodology - Europe 2020 target on poverty and social exclusion - Statistics Explained." Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_statistics_on_income_and_living_conditions_\(EU-SILC\)_methodology_-_Europe_2020_target_on_poverty_and_social_exclusion](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_statistics_on_income_and_living_conditions_(EU-SILC)_methodology_-_Europe_2020_target_on_poverty_and_social_exclusion)
- [186] J. D. Healy, "Housing, fuel poverty and health: a pan-European analysis," 2016.
- [187] Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, "Actualización de indicadores de pobreza energética. 2022."
- [188] A. Sanz Fernández, G. Gómez Muñoz, C. Sánchez-Guevara Sánchez, and M. Núñez Peiró, "Estudio técnico sobre pobreza energética en la ciudad de Madrid," p. 186, 2017.
- [189] F. Martín-Consuegra, F. de Frutos, I. Oteiza, and H. A. Agustín, "Use of cadastral data to assess urban scale building energy loss. Application to a deprived quarter in Madrid," *Energy Build*, vol. 171, no. 2018, pp. 50–63, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.007.
- [190] Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico., "Estrategia a Largo Plazo para una economía española moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050."
- [191] INE, "Encuesta Continua de Hogares," 2014. [Online]. Available: <http://www.ine.es/prensa/np837.pdf>
- [192] BOE. RD 2429/79, *Normas Básicas de la Edificación. NBE-CT-79*. 1979, p. 24524.
- [193] J. Santamaría, S. Girón, and M. A. Campano, "Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate," *Energy Build*, vol. 128, pp. 772–784, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.07.035.
- [194] M. D. Alba-Rodríguez, A. Martínez-Rocamora, P. González-Vallejo, A. Ferreira-Sánchez, and M. Marrero, "Building rehabilitation versus demolition and new construction: Economic and environmental assessment," *Environ Impact Assess Rev*, vol. 66, pp. 115–126, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.EIAR.2017.06.002.

- [195] U. Munarim and E. Ghisi, "Environmental feasibility of heritage buildings rehabilitation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 235–249, May 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.334.
- [196] G. Dall'O', A. Galante, and G. Pasetti, "A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks," *Sustain Cities Soc*, vol. 4, no. 1, pp. 12–21, Oct. 2012, doi: 10.1016/J.SCS.2012.01.004.
- [197] "Energy efficiency first principle." Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-first-principle_en
- [198] S. Varela Luján, C. Viñas Arrebola, A. Rodríguez Sánchez, P. Aguilera Benito, and M. González Cortina, "Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements," *Sustain Cities Soc*, vol. 51, p. 101713, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.SCS.2019.101713.
- [199] A. Blasco Gutiérrez, "Monitorización y análisis de pérdidas de calor en cubiertas planas invertidas," 2017.
- [200] S. Zene Chaban-Kabakibo, "Evolución de las cubiertas ecológicas, y su implementación en Madrid," 2020.
- [201] Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), "Soluciones de acristalamiento y cerramiento acristalado," 2019.
- [202] L. C. H. Sosa, "Eficiencia de estrategias de enfriamiento pasivo en clima cálido seco," *Revista de Arquitectura*, vol. 16, no. 1, pp. 86–95, Jul. 2014, doi: 10.14718/REVARQ.2014.16.10.
- [203] J. D. Marcos, M. Izquierdo, and D. Parra, "Solar space heating and cooling for Spanish housing: Potential energy savings and emissions reduction," *Solar Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2622–2641, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.SOLENER.2011.08.006.
- [204] D. Long, S. Ploix, M. Jacomino, and M. Hoang, "Home Energy Management Problem: towards an Optimal and Robust Solution," *Energy Management*, Mar. 2010, doi: 10.5772/39527.
- [205] M. Martinez-Pabon, T. Eveleigh, and B. Tanju, "Optimizing residential energy management using an autonomous scheduler system," *Expert Syst. Appl.*, vol. 96, pp. 373–387, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.ESWA.2017.12.017.
- [206] N. S. Ibañez Iralde, J. Pascual, and J. Salom, "Energy retrofit of residential building clusters. A literature review of crossover recommended measures, policies instruments and allocated funds in Spain," *Energy Build*, vol. 252, p. 111409, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111409.

- [207] I. S. Walker, B. D. Less, and N. Casquero-Modrego, "Carbon and energy cost impacts of electrification of space heating with heat pumps in the US," *Energy Build*, vol. 259, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111910.
- [208] "Light Sources - European Commission." Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/light-sources_en
- [209] "Etiquetado energético de electrodomésticos | Idae." Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.idae.es/conozcanos/proyectos-de-excelencia/etiquetado-energetico-de-electrodomesticos>
- [210] European Environment Agency, "Energy prosumers in Europe - Citizen participation in the energy transition," 2022.
- [211] D. Griego, S. Schopfer, G. Henze, E. Fleisch, and V. Tiefenbeck, "Aggregation effects for microgrid communities at varying sizes and prosumer-consumer ratios," *Energy Procedia*, vol. 159, pp. 346–351, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.01.004.
- [212] F. Dinmohammadi, Y. Han, and M. Shafiee, "Predicting Energy Consumption in Residential Buildings Using Advanced Machine Learning Algorithms," *Energies 2023, Vol. 16, Page 3748*, vol. 16, no. 9, p. 3748, Apr. 2023, doi: 10.3390/EN16093748.
- [213] J. A. Kroll and F. Ziegler, "The use of ground heat storages and evacuated tube solar collectors for meeting the annual heating demand of family-sized houses," *Solar Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2611–2621, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.SOLENER.2011.08.001.
- [214] A. Cerezo-Narváez, M. J. Bastante-Ceca, and J. M. Piñero-Vilela, "Economic and environmental assessment on implementing solar renewable energy systems in spanish residential homes," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 4183, Jul. 2021, doi: 10.3390/EN14144183/S1.
- [215] A. Fraser-Harris *et al.*, "The Geobattery Concept: A Geothermal Circular Heat Network for the Sustainable Development of Near Surface Low Enthalpy Geothermal Energy to Decarbonise Heating," *Earth Science, Systems and Society*, vol. 2, Mar. 2022, doi: 10.3389/ESSS.2022.10047.
- [216] A. Kitsopoulou *et al.*, "Dynamic Energy Analysis of Different Heat Pump Heating Systems Exploiting Renewable Energy Sources," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/SU151411054.
- [217] F. Chiriac *et al.*, "Low power absorption refrigeration systems, with storage, for air conditioning, driven by renewable energy sources.", Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/>

- [218] D. Parra, M. Gillott, and G. S. Walker, "The role of hydrogen in achieving the decarbonization targets for the UK domestic sector," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 9, pp. 4158–4169, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2014.01.023.
- [219] M. Arbabzadeh, R. Sioshansi, J. X. Johnson, and G. A. Keoleian, "The role of energy storage in deep decarbonization of electricity production," *Nature Communications* 2019 10:1, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, Jul. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-11161-5.
- [220] K. Uddin, T. Jackson, W. D. Widanage, G. Chouchelamane, P. A. Jennings, and J. Marco, "On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system," *Energy*, vol. 133, pp. 710–722, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.04.116.
- [221] S. Rivera *et al.*, "Charging Infrastructure and Grid Integration for Electromobility," *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 4, pp. 371–396, Apr. 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3216362.
- [222] F. Álvarez, Ó. Arnedillo, D. Rodríguez, and J. Sanz, "Decarbonisation at least cost: an analysis of the optimal portfolio of instruments," *Applied Economic Analysis*, vol. 32, no. 95, pp. 88–111, Aug. 2024, doi: 10.1108/AEA-01-2024-0012/FULL/PDF.
- [223] M. De Luxán García de Diego, C. Sánchez-Guevara Sánchez, E. Román López, M. del M. Barrero Barrera, and G. Gómez Muñoz, *Rehabilitación expres para hogares vulnerables*. 2017.
- [224] B. D. Less, N. Casquero-Modrego, and I. S. Walker, "Home Energy Upgrades as a Pathway to Home Decarbonization in the US: A Literature Review," Aug. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15155590.
- [225] I. S. W. Núria, C.-M. Brennan, and D. Less, "Challenges and Opportunities for Home Decarbonization Challenges and Opportunities for Home Decarbonization," 2001, doi: 10.20357/B7XG7T.
- [226] I. S. Walker, B. D. Less, and N. Casquero-Modrego, "Pathways to Home Decarbonization Energy Technologies Area," 2022, doi: 10.20357/B7JG7.
- [227] P. Berrill, E. J. H. Wilson, J. L. Reyna, A. D. Fontanini, and E. G. Hertwich, "Decarbonization pathways for the residential sector in the United States," *Nature Climate Change* 2022 12:8, vol. 12, no. 8, pp. 712–718, Aug. 2022, doi: 10.1038/s41558-022-01429-y.
- [228] H. E. Beck, N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, and E. F. Wood, "Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution," *Sci Data*, vol. 5, 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.214.
- [229] C. Giannakopoulos, P. Le Sager, M. Bindi, M. Moriondo, E. Kostopoulou, and C. M. Goodess, "Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global

- p warming,”
- Glob Planet Change*
- , vol. 68, no. 3, pp. 209–224, 2009, doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001.
- [230] Ayuntamiento de Madrid, “Hoja de ruta hacia la neutralidad-climatica en 2050”.
- [231] Carlos Sambricio, “I. De la Ciudad Ilustrada a la primera mitad del siglo XX Comunidad de Madrid,” 1999.
- [232] C. J.M., “Don Carlos María de Castro y Madrid.pdf,” 1960.
- [233] Área de Gobierno Urbanismo y Vivienda, “150 aniversario del Anteproyecto de Ensanche de Madrid,” 2010.
- [234] F. De Terán, “Crecimiento urbano y planeamiento de Madrid.”
- [235] F. de Terán, *Historia del Urbanismo en España III: Siglos XIX y XX*. 1999. [Online]. Available: http://oa.upm.es/23186/2/HaUrbanismo_todo_opt_2.pdf
- [236] R. Guerra Garrido and E. Alaminos López, “Gran Vía de Madrid 1910-2010,” 2010.
- [237] P. Navascués, “Antecedentes, veinticinco años de arquitectura en Madrid (1900-1925),” in *El edificio de la Telefónica*, Espasa Calpe, Ed., 1984.
- [238] L. P. Maure Rubio, “Secundino Zuazo y la extensión de Madrid,” in *Anteproyecto del trazado viario y urbanización de Madrid : Zuazo-Jansen: 1929-1930*, 1986.
- [239] P. Barreiro Perea, “Casas baratas: la vivienda social en Madrid 1900 - 1939,” Madrid, 1991.
- [240] Luis Moya González, “Barrios de promoción oficial,” 1974.
- [241] A. delgado Jiménez, “Evolución y Crisis de la Región Metropolitana de Madrid 1985-2007,” 2012.
- [242] Ramón López de Lucio, “Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid,” *urban 9*.
- [243] Ortiz Núñez S., “Planteamiento y Políticas de Vivienda en el Área Metropolitana de Madrid 1975-2007,” pp. 2014–2015, 2013.
- [244] R. López De Lucio, “Madrid 1979-1999. Perfiles de una transformación urbana desconocida.”
- [245] Esperanza González-Redondo, “Las ‘casas a la malicia’ en Madrid y su transformación en edificios de entramado de madera ‘modernos’ (1656-1868): construcciones originales vs. estructuras añadidas,” *Informes de la Construcción*, no. 72, p. 559, 2020, doi: <https://doi.org/10.3989/ic.74057>.
- [246] Esperanza González-Redondo, “Los primeros entramados de madera y muros de ‘doble hoja’: las posadas de Madrid (1669-1798) | Informes de la Construcción,” *Informes de la Construcción*, no. 71, p. 556, 2019, doi: <https://doi.org/10.3989/ic.66687>.

- [247] E. González Redondo, "De la construcción entramada a la introducción de estructuras metálicas en Madrid," *Informes de la Construcción*, vol. 66, p. 534, 2014, doi: 10.3989/ic.12.100.
- [248] Ricardo Aroca Hernández-Ros and Esperanza González Redondo, "Tipificación de las soluciones constructivas de la edificación doméstica madrileña de los siglos XVIII y XIX," in *Tercer Congreso Nacional de la Construcción*, Sevilla, 2000. Accessed: Sep. 21, 2024. [Online]. Available: https://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC3_006_Aroca%20R.pdf
- [249] F. Arriaga, C. Osuna-Sequera, M. Esteban, G. Íñiguez-González, and I. Bobadilla, "In situ assessment of the timber structure of an 18th century building in Madrid, Spain," *Constr Build Mater*, vol. 304, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124466.
- [250] P. Casademunt, "La cámara ventilada como recurso constructivo durante el siglo XIX en Barcelona," 1998.
- [251] Antoni Paricio Casademunt, "La innovación tecnológica de las cubiertas planas del GATCPAC," in *Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, 1996.
- [252] J. M. Pons-Poblet and A. Arboix-Alió, "The Restrictions on Iron in Construction Ordinance. The Forgotten Regulation," *Informes de la Construcción*, vol. 74, no. 567, 2022, doi: 10.3989/ic.90270.
- [253] A. Martínez-Corral and D. Cuéllar, "Housing constructive solutions during Francoism: The case of railway housing," *Informes de la Construcción*, vol. 72, no. 558, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3989/ic.71047.
- [254] Ministerio de la Gobernación, "ORDEN de 29 de febrero de 1944 por la que se determinan las condiciones higiénicas mínimas que han reunir las viviendas."
- [255] A. Martínez-Corral, J. Cárcel-Carrasco, J. Kaur, and F. C. Fonseca, "Analysis of thermal insulation in social housing in Spain (1939–1989) and its possible adaptation to the Sustainable Development Goals (SDGs)," *AIMS Energy*, vol. 10, no. 6, pp. 1190–1215, 2022, doi: 10.3934/ENERGY.2022056.
- [256] Ignacio Oteiza, Carmen Alonso, Fernando Martín-Consuegra, Juan Monjo, Miriam González Moya, and Alberto Buldón, *La envolvente energética de la vivienda social en el caso de Madrid en el periodo 1939-1979*. Madrid, 2018.
- [257] J. Monjo Carrió, "The evolution of construction systems in building industrialization procedures," *Informes de la Construcción*, 2005.
- [258] F. Kurtz, M. Monzón, and B. López-Mesa, "Obsolescencia de la envolvente térmica y acústica de la vivienda social de la postguerra española en áreas urbanas vulnerables: El caso de Zaragoza," *Informes de la Construcción*, vol. 67, no. Extra1, 2015, doi: 10.3989/ic.14.062.

- [259] J. – González, M. – Valdivieso, J. García Navarro, M. Jesús González Díaz, and M. Valdivieso Rodríguez, “Construction costs and energy consumptions resulting from energy retrofitting in a residential building in Madrid (Spain),” *Revista de la Construcción Journal of Construction*, vol. 67, no. 123, pp. 67–75, 2013.
- [260] S. Domínguez, J. J. Sendra, and I. Oteiza, “La envolvente térmica de la vivienda social: el caso de Sevilla, 1939 a 1979,” *Monografías del Instituto Eduardo Torroja. Serie arquitectura*, pp. 1–174, 2016, Accessed: Sep. 20, 2024. [Online]. Available: <https://editorial.csic.es/publicaciones/libros/12659/978-84-00-10124-4/la-envolvente-termica-de-la-vivienda-social-el-cas.html>
- [261] Á. B. Magro, L. Enrique, and O. Carvajal, “Madrid, de territorio fronterizo a región metropolitana”.
- [262] “Vista de La fábrica de doble hoja en Madrid, un siglo de cerramiento moderno.” Accessed: Sep. 20, 2024. [Online]. Available: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/455/528>
- [263] CTE-DB-HE_2006, “Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Ahorro de Energía.” Accessed: Oct. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- [264] “Sede Electrónica del Catastro - Inicio.” Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.sedecatastro.gob.es/>
- [265] “INE. Instituto Nacional de Estadística.” Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.ine.es/>
- [266] H. López Moreno, “Evaluation of weather conditions in urban climate studies over different Madrid neighbourhoods: Influence of urban morphologies on the microclimate,” *International Solar Energy Society (ISES)*, Dec. 2021, pp. 1–12. doi: 10.18086/eurosun.2020.09.03.
- [267] E. Giancola, M. N. Sánchez, H. López, J. A. Ferrer, M. J. Jimenéz, and S. Soutullo, “Updated climate files in the simulation of residential buildings,” in *17th IBPSA World Building Energy Simulation 2021 conference*, International Building Performance Simulation Association, 2022, pp. 870–877. doi: 10.26868/25222708.2021.30772.
- [268] “Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España.” Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.aemet.es/es/portada>
- [269] H. López-Moreno, M. N. Sánchez Egido, E. Giancola, J. A. Ferrer Tevar, F. J. González Neila, and S. Soutullo Castro, “Outdoor thermal comfort approach in summer season for the city of Madrid Influence of urban typologies in microclimate and the outdoor thermal sensation,” in *Planning Post Carbon Cities. Proceedings of the 35th PLEA Conference on Passive and Low*

- Energy Architecture*, J. Rodríguez Álvarez and J. C. Soares Gonçalves, Eds., A Coruña: University of A Coruña, 2020, pp. 730–735. doi: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497947>.
- [270] “Red de estaciones de vigilancia de calidad del aire - Ayuntamiento de Madrid.” Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Direcciones-y-telefonos/Red-de-estaciones-fijas-de-control-de-calidad-del-aire/?vgnextfmt=default&vgnextoid=aeca16d591bbf710VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=864f79ed268fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>
- [271] E. Sirombo, M. Filippi, A. Catalano, and A. Sica, “Building monitoring system in a large social housing intervention in Northern Italy,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 386–397. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.151.
- [272] Fco. J. Neila González *et al.*, *Urban heat island, urban climate and building energy consumption. MODIFICA Project*. 2020.
- [273] M. Núñez-Peiró, “Modelo empírico de la isla de calor urbana de Madrid para su integración en la simulación energética de edificios,” Universidad Politécnica de Madrid, 2021.
- [274] M. Núñez-Peiró, C. Sánchez-Guevara Sánchez, and F. J. Neila González, “Hourly evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones. The case of Madrid,” *Urban Clim*, vol. 39, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100921.
- [275] M. N. Sánchez, S. Soutullo, R. Olmedo, D. Bravo, S. Castaño, and M. J. Jiménez, “An experimental methodology to assess the climate impact on the energy performance of buildings: A ten-year evaluation in temperate and cold desert areas,” *Appl Energy*, vol. 264, no. February, p. 114730, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114730.
- [276] R. Olmedo, M. N. Sánchez, R. Enríquez, M. J. Jiménez, and R. Heras María, “ARFRISOL Buildings-UIE3-CIEMAT. In: Janssens A, editor. Report of Subtask 1a: Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances. IEA EBC Annex 58,” Belgium, 2016. [Online]. Available: www.ugent.be
- [277] AENOR, “UNE-EN ISO-15927-4:2011,” 2011. [Online]. Available: www.aenor.esTel.:902Fax:913
- [278] J. M. Finkelstein and R. E. Schafer, “Biometrika Trust Improved Goodness-Of-Fit Tests,” 1971. [Online]. Available: <http://www.jstor.orgURL:http://www.jstor.org/stable/2334400>
- [279] Publicaciones DYNA SL, “Creation of a typical meteorological year in Spain. Step by step application of the method based on UNE-EN-ISO-15927-4:2011,” www.revistadyna.com, doi: 10.6036/XXXX.

- [280] T. Kalamees *et al.*, “Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard,” *Energy Build*, vol. 47, pp. 53–60, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2011.11.031.
- [281] D. Pissimanis, G. Karras, V. Notaridou, and K. Gavra, “The generation of a ‘typical meteorological year’ for the city of Athens,” *Solar Energy*, vol. 40, no. 5, pp. 405–411, Jan. 1988, doi: 10.1016/0038-092X(88)90095-3.
- [282] I. J. Hall, R. R. Prairie, H. E. Anderson, and E. C. Boes, “Generation of a typical meteorological year,” United States, 1978. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/7013202>
- [283] “Documentos CTE.” Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/DocumentosCTE.html>
- [284] “Código Técnico de la Edificación.”
- [285] “Predicting Climate | NOAA Climate.gov.” Accessed: May 05, 2020. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/maps-data/primer/predicting-climate>
- [286] IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenb.
- [287] E. Rodrigues, M. S. Fernandes, and D. Carvalho, “Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application,” *Build Environ*, vol. 233, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110104.
- [288] A. Programs, “EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation,” 2022.
- [289] S. Reiter, “Correspondences between the conception principles of sustainable public spaces and the criteria of outdoor comfort,” 2004.
- [290] E. C. Thom, “The Discomfort Index,” *Weatherwise*, vol. 12, no. 2, pp. 57–61, Apr. 1959, doi: 10.1080/00431672.1959.9926960.
- [291] I. Tselepidaki, M. Santamouris, C. Moustris, and G. Pouloupoulou, “Analysis of the summer discomfort index in Athens, Greece, for cooling purposes,” 1992.
- [292] G. Martinopoulos, A. Alexandru, and K. T. Papakostas, “Mapping temperature variation and degree-days in metropolitan areas with publicly available sensors,” *Urban Clim*, vol. 28, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100464.
- [293] “BOE-A-2007-15820 Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.” Accessed: May 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-15820>
- [294] “BOE-A-2022-12925 Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, de medidas de sostenibilidad económica en el ámbito del transporte, en materia de becas y ayudas al estudio, así como de

- p>medidas de ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural.” Accessed: May 23, 2024. [Online]. Available:
- <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-12925>
- [295] H. López-Moreno, M. Núñez-Peiró, C. Sánchez-Guevara, and J. Neila, “On the identification of Homogeneous Urban Zones for the residential buildings’ energy evaluation,” *Build Environ*, vol. 207, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108451.
- [296] A. Wicki, E. Parlow, and C. Feigenwinter, “Evaluation and modeling of urban heat island intensity in Basel, Switzerland,” *Climate*, vol. 6, no. 3, 2018, doi: 10.3390/cli6030055.
- [297] E. E. Agency, “CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service.” Accessed: Jan. 15, 2020. [Online]. Available: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- [298] European Environment Agency, “Urban Atlas 2012 — Copernicus Land Monitoring Service.” Accessed: Jan. 15, 2020. [Online]. Available: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012?tab=metadata>
- [299] I. D. Stewart and T. R. Oke, “Local Climate Zones for Urban Temperature Studies,” *Bull Am Meteorol Soc*, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, Dec. 2012, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- [300] C. Ren *et al.*, “WUDAPT Global Initiative: Census of Global Cities,” 2015. doi: 10.1068/b32143.
- [301] J. M. Salmerón, A. Cerezuela, and R. Salmerón, “IDAE. Escala de calificación energética Edificios existentes. Madrid (2010),” Madrid, 2010. Accessed: Aug. 13, 2021. [Online]. Available: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11261_EscalaCalifEnerg_EdifExistentes_2011_accesible_c762988d.pdf
- [302] T. Loga, B. Stein, and N. Diefenbach, “TABULA building typologies in 20 European countries— Making energy-related features of residential building stocks comparable,” *Energy Build*, vol. 132, pp. 4–12, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.094.
- [303] A. Arriazu Ramos, “Evaluación del sobrecalentamiento interior y de la capacidad adaptativa del parque residencial de pamplona frente al cambio climático,” p. 1, 2024, Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=335267&info=resumen&idioma=SPA>
- [304] A. H. Baur, M. Förster, and B. Kleinschmit, “The spatial dimension of urban greenhouse gas emissions: analyzing the influence of spatial structures and LULC patterns in European cities,” *Landsc Ecol*, vol. 30, no. 7, pp. 1195–1205, 2015, doi: 10.1007/s10980-015-0169-5.
- [305] A. M’Saouri El Bat, Z. Romani, E. Bozonnet, and A. Draoui, “Thermal impact of street canyon microclimate on building energy needs using TRNSYS: A case study of the city of Tangier in

- Morocco,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 24, p. 100834, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2020.100834.
- [306] A. Forouzandeh and T. Richter, “Accurate prediction of heating energy demand of courtyard’s surrounding envelopes using temperature correction factor,” *Energy Build*, vol. 193, pp. 49–68, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.03.030.
- [307] Z. Yu and G. Yang, “Quantifying seasonal and diurnal contributions of urban landscapes to heat energy dynamics,” *Appl Energy*, no. February, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114724.
- [308] E. Gatto *et al.*, “Impact of Urban vegetation on outdoor thermal comfort: Comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a northern European city (Lahti, Finland),” *Forests*, vol. 11, no. 2, 2020, doi: 10.3390/f11020228.
- [309] N. H. Gapski and D. L. Marinowski, “Urban microclimate at height,” in *XVII Encotro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, ANTAC, Nov. 2023, pp. 1–8. doi: 10.46421/encac.v17i1.3772.
- [310] J. M. Cuadrat Prats, S. M. Vicente-Serrano, and M. A. Saz Sánchez, “Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La isla de calor y sus factores condicionantes.”
- [311] E. Liapopoulou and Y. Heo, “The effect of urban geometry on microclimate,” in *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 2019, pp. 777–784. doi: 10.26868/25222708.2019.211227.
- [312] H. Coolen and J. Meesters, “Private and public green spaces: Meaningful but different settings,” *Journal of Housing and the Built Environment*, vol. 27, no. 1, pp. 49–67, 2012, doi: 10.1007/s10901-011-9246-5.
- [313] “Sede Electrónica del Catastro - Inicio.” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.sedecatastro.gob.es/>
- [314] “Nomecalles.” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online]. Available: https://gestiona.comunidad.madrid/nomecalles_web/#/inicio
- [315] “Compendio 2024 de las Normas Urbanísticas del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid de 1997 (actualizado a 23.02.2024) - Portal de transparencia del Ayuntamiento de Madrid.” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online]. Available: <https://transparencia.madrid.es/portales/transparencia/es/Transparencia-por-sectores/Urbanismo/Planeamiento-urbanistico/Compendio-2024-de-las-Normas-Urbanisticas-del-Plan-General-de-Ordenacion-Urbana-de-Madrid-de-1997-actualizado-a-23-02-2024-/vgnnextfmt=default&vgnextoid=35bd1e7cb8fed810VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnextchannel=eae9508929a56510VgnVCM1000008a4a900aRCRD>

- [316] “Conjuntos de datos - Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid.” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online]. Available: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.9e1e2f6404558187cf35cf3584f1a5a0/?vgnextoid=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnnextfmt=default>
- [317] “About ArcGIS | Mapping & Analytics Software and Services.” Accessed: May 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>
- [318] E. Liapopoulou and Y. Heo, “The effect of urban geometry on microclimate,” in *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 2019, pp. 777–784. doi: 10.26868/25222708.2019.211227.
- [319] S. Rueda Coordinación *et al.*, “Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla,” Barcelona, 2008. Accessed: Aug. 13, 2021. [Online]. Available: <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0681581.pdf>
- [320] A. Wicki, E. Parlow, and C. Feigenwinter, “Evaluation and modeling of urban heat island intensity in Basel, Switzerland,” *Climate*, vol. 6, no. 3, 2018, doi: 10.3390/cli6030055.
- [321] “Kolmogorov--Smirnov Test,” in *The Concise Encyclopedia of Statistics*, New York, NY: Springer New York, 2008, pp. 283–287. doi: 10.1007/978-0-387-32833-1_214.
- [322] N. Tornay, R. Schoetter, M. Bonhomme, S. Faraut, and V. Masson, “GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations,” *Urban Clim*, vol. 20, pp. 75–93, 2017, doi: 10.1016/j.uclim.2017.03.002.
- [323] Ministerio de Fomento, “Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos.”
- [324] C. Villanueva-Díaz, M. Álvarez-Sanz, Á. Campos-Celador, and J. Terés-Zubiaga, “The Open Data Potential for the Geospatial Characterisation of Building Stock on an Urban Scale: Methodology and Implementation in a Case Study †,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16020652.
- [325] I. Theodoridou, A. M. Papadopoulos, and M. Hegger, “A typological classification of the Greek residential building stock,” *Energy Build*, vol. 43, no. 10, pp. 2779–2787, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.036.
- [326] H. López Moreno *et al.*, “Mapping Priority Energy Intervention Areas in Birmingham (UK). Priority Energy Intervention Areas methodology (PEIA),” in *13 th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry. EuroSun*, 2020, p. 962. doi: 10.18086/eurosun.2020.13.02.

- [327] P. Garrido Torres, "Vida y obsolescencia de fachadas del siglo XX en la ciudad de Barcelona. El caso de los edificios sin protección patrimonial: factores de influencia y estrategias de diseño en relación a los efectos del paso del tiempo," Ph.D. dissertation. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2015. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/95750>
- [328] E. Giancola, "El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas," Ph.D. dissertation, Ph.D. dissertation. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, 2010. doi: <http://oa.upm.es/9776/>.
- [329] Helena López Moreno, Emanuela Giancola, M. Nuria Sánchez Egido, and Silvia Soutullo Castro, "Respuesta de las tipologías edificatorias representativas de la ciudad de Madrid a los estándares de confort térmico adaptativo ante las nuevas tendencias climáticas," in *Innovación Tecnológica y desarrollo sostenible en la edificación.*, Dykinson S.L., 2022.
- [330] E. Cuerda, O. Guerra-Santin, J. J. Sendra, and F. J. Neila, "Understanding the performance gap in energy retrofitting: Measured input data for adjusting building simulation models," *Energy Build*, vol. 209, p. 109688, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109688.
- [331] F. Martín-Consuegra, J. M. Gómez Giménez, C. Alonso, R. Córdoba Hernández, A. Hernández Aja, and I. Oteiza, "Multidimensional index of fuel poverty in deprived neighbourhoods. Case study of Madrid," *Energy Build*, vol. 224, p. 110205, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.110205.
- [332] A. Martínez-Corral and D. Cuéllar, "Las soluciones constructivas en la vivienda durante el franquismo: el caso de la vivienda ferroviaria," *Informes de la Construcción*, vol. 72, no. 558, p. 341, 2020, doi: 10.3989/ic.71047.
- [333] M. de Luxán García de Diego, M. Vázquez Espí, G. Gómez Muñoz, E. Román López, and M. Barbero Barrera, "Actuaciones con criterios de sostenibilidad," Madrid, 2009.
- [334] E. Cuerda, M. Pérez, and J. Neila, "Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock," *Energy Build*, vol. 76, pp. 119–129, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.054.
- [335] N. C. Sánchez, "La envolvente en la rehabilitación de conjuntos de vivienda protegida," *ACE Architecture , City and Environment The building envelope in the rehabilitation of affordable housing estates*, vol. 14, no. 42, pp. 0–2, 2019.
- [336] S. Varela Luján, C. Viñas Arrebola, A. Rodríguez Sánchez, P. Aguilera Benito, and M. González Cortina, "Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements," *Sustain Cities Soc*, vol. 51, no. July, p. 101713, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101713.
- [337] M. De Luxán and G. Gómez, "Two dwellings in San Cristóbal de los Ángeles, Madrid," *Informes de la Construcción*, vol. 58, no. 502, pp. 5–16, 2006, doi: 10.3989/ic.2006.v58.i502.383.

- [338] O. Pombo, K. Allacker, B. Rivela, and J. Neila, "Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting - A case study of the Spanish housing stock," *Energy Build*, vol. 116, pp. 384–394, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.
- [339] F. Martín-Consuegra, F. de Frutos, I. Oteiza, C. Alonso, and B. Frutos, "Minimal monitoring of improvements in energy performance after envelope renovation in subsidized single family housing in Madrid," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/su13010235.
- [340] E. Cuerda Barcaiztegui and J. Neila Gonzalez, "Procedimiento de análisis y evaluación para la rehabilitación térmica de cerramientos de fachada en edificios residenciales. Caso de estudio en el barrio Pinar del Rey, Madrid," *Congreso Nacional de Medio Ambiente 2012*, 2012.
- [341] E. Giancola, S. Soutullo, R. Olmedo, and M. R. Heras, "Evaluating rehabilitation of the social housing envelope: Experimental assessment of thermal indoor improvements during actual operating conditions in dry hot climate, a case study," *Energy Build*, vol. 75, pp. 264–271, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.010.
- [342] J. García-Navarro, M. J. González-Díaz, and M. Valdivieso, "Assessment of construction costs and energy consumption resulting from house energy ratings in a residential building placed in Madrid: "Precost&e Study"," *Informes de la construcción*, vol. 66, no. 535, 2014, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.052>
- [343] M. J. Gavira, G. Pérez, C. Acha, and A. Guerrero, "Thermochromic mortar facade coating: Impact on the building energy performance," *Informes de la Construcción*, vol. 72, no. 558, pp. 1–10, 2020, doi: 10.3989/ic.69899.
- [344] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico and Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios," *Documento Reconocido para la certificación de eficiencia energética*, p. 31, 2020, [Online]. Available: https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/normativamodelosutilizacion/1-Condiciones_tecnicas_procedimientos_para_evaluacion_eficiencia_energetica.pdf
- [345] J. J. S. & Fco. J. N. G. Elena Cuerda, Olivia Guerra-Santin, "Comparing the impact of presence patterns on energy demand in residential buildings using measured data and simulation models," *Build Simul*, vol. 12, no. 4, pp. 985–988, 2019, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [346] "EnergyPlus | Department of Energy." Accessed: Mar. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>

- [347] "DesignBuilder Software Ltd - Home." Accessed: Mar. 10, 2022. [Online]. Available: <https://designbuilder.co.uk/>
- [348] Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCO y AICIA, "Catálogo de elementos constructivos del CTE."
- [349] R. de Dear, J. Xiong, J. Kim, and B. Cao, "A review of adaptive thermal comfort research since 1998," May 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109893.
- [350] H. López Moreno, E. Giancola, M. N. Sánchez Egido, and S. Soutullo Castro, "Respuesta de las tipologías edificatorias representativas de la ciudad de Madrid a los estándares de confort térmico adaptativo ante las nuevas tendencias climáticas," in *Innovación tecnológica y desarrollo sostenible en la edificación*, vol. 1, no. 1, Madrid, Spain: Dykinson S.L., 2022, pp. 233-250 ISBN:9780333227794.
- [351] European Parliament, "European Parliament P9_TA(2023)0068 Energy performance of buildings (recast)," vol. 0426, no. March 2023, 2019.
- [352] UNE-EN-16798-1, "Eficiencia energética de los edificios. Ventilación para edificios. Parte 1: Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, con," p. 87, 2020.
- [353] ASHRAE, "Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings," 2014. [Online]. Available: www.ashrae.org
- [354] Verein deutscher ingenieure, "VDI 6020 Requirements to be met by calculation methods for the simulation of thermal-energy efficiency of buildings and building installations," 2022.
- [355] CISBE, "TM63: Operational performance: Building performance modelling and calibration for evaluation of energy in-use."
- [356] Helena López Moreno, Emanuela Giancola, M. Nuria Sánchez Egido, and Silvia Soutullo Castro, "Response of thermal comfort standards' applied to representative building typologies under new climate trends in Madrid," in *7th International Conference on Technological Innovation in Building CITE 2022*, 2022, pp. 37–38.
- [357] "INEbase / Nivel y condiciones de vida (IPC) /Condiciones de vida /Atlas de distribución de renta de los hogares / Últimos datos." Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177088&menu=ultiDatos&idp=1254735976608
- [358] "CYTED." Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.cyted.org/REDENARQUI>
- [359] "LIFE 3.0 - LIFE23-CET-OBSERVE/101167643." Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available: <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE23-CET-OBSERVE-101167643/support-for-setting-up-national-building-stock-observatories>

[360] "CityBES." Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available:
https://citybes.lbl.gov/#citybes_overview

Lista de figuras

Figura 1. Esquema representativo de la metodología utilizada para la definición de hogares de actuación energética prioritaria ante los escenarios de cambio climático en Zonas Urbanas Homogéneas (HUZs)	5
Figura 2. Anomalías de las temperaturas globales en superficie y océanos para la serie de 1880-20227	
Figura 3. Serie de temperaturas medias anuales y carácter térmico (respecto de la media 1991-2020) en España desde 1961 a 2023. Fuente: AEMET [16].....	8
Figura 4. Sendas socioeconómicas compartidas (SSPs, Shared Socioeconomic Pathways) y su relación con el aumento de la temperatura superficial global desde 1850 (°C) en función de las emisiones acumuladas de CO ₂ (GtCO ₂). Imagen adaptada del [30]	10
Figura 5. Número de edificios en Europa (EU27) catalogados por sector residencial y servicios. Elaboración propia a partir de BSO (2022) [34].	11
Figura 6. Características de las viviendas en la UE y España. a) Número de viviendas principales, secundarias y superficie media (izquierda). b) Cantidad de viviendas principales catalogados por año y tipología (derecha). Elaboración propia a partir de BSO (2022) y ECH (2020) [34], [35].	12
Figura 7. Densidad de urbanización. a) Población en Europa en 2021 (izquierda). b) Cantidad de viviendas principales en España en 2020 (derecha). Elaboración propia a partir de Eurostat y ECH [35], [39]... ..	12
Figura 8. Consumo de energía final. a) Consumo por sector en la UE en 2021 (izquierda). b) Comparación del consumo en Europa y España en PJ/año en 2021 (centro). Comparación de emisiones de GEI en Europa y España en MtCO ₂ eq/año en 2021 (derecha). Elaboración propia a partir de BSO [34].....	13
Figura 9. Consumo por usos y tipo de energía del sector residencial en España en 2022. Elaboración propia a partir del IDAE [40]	13
Figura 10. Condiciones socioeconómicas de la población en la UE y España. a) Porcentaje de riesgo de pobreza o exclusión social en el año 2024. b) Porcentaje de población con inconvenientes para conseguir unos mínimos de habitabilidad en el año 2020. Elaboración propia a partir de EU-SILC y BSO [34] [54].....	16
Figura 11. Condiciones de la población en la UE y España. a) Porcentaje de cantidad de población según su rango de edad y sexo en 2024. b) Porcentaje de población en función de sus condiciones autopercebida de salud en 2023. Elaboración propia a partir de Eurostat [41].	18
Figura 12. Evolución urbanística de Madrid (1900-2020). a) Localización de la edificación por años. b) Incremento del número de edificios y población. Elaboración propia a partir de [263], [264].....	60
Figura 13. Funciones CDF_ST y CDF_LT de Ta y Gh de los meses de enero del periodo 2008-2017. Fuente [278]	67
Figura 14. Datos de temperatura del aire (Ta) para los climas actuales MET, IWECE y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.....	71
Figura 15. Datos de humedad relativa (HR) para los climas actuales MET, IWECE y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1, SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.....	72

Figura 16. Datos de velocidad del viento (Vv) para los climas actuales MET, IWECE y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1. SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.....	73
Figura 17. Datos de radiación global horizontal (Gh), para los climas actuales MET, IWECE y TMY experimental, así como sus escenarios futuros SSP1. SSP2 y SSP5 para el año 2050 y 2080.	74
Figura 18. Indicadores climáticos de Rango de Temperatura Extrema (ETR), Días de Verano (SU), Noches Tropicales (TR), Días helados (FD) y Humedad Relativa (HR), para los archivos climáticos MET, IWECE, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.	78
Figura 19. Valores del indicador urbano de confort térmico exterior Malestar por calor (DI) para para los archivos climáticos MET, IWECE, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.....	78
Figura 20. Valores de los grados-día-hora de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD) para para los archivos climáticos MET, IWECE, TMY y sus proyecciones SSP1-2.6, SSP2- 4.5, y SSP5-8.5 para los años 2050 y 2080.	79
Figura 21. Metodología HUZ. Fase 1: Recopilación de datos de diversas fuentes de clasificaciones urbanas e indicadores.	84
Figura 22. Metodología HUZ. Fase 1: clasificaciones urbanas nacionales, regionales y locales existentes para Madrid.	85
Figura 23. Metodología HUZ. Fase 2: proceso de identificación y caracterización de conglomerados urbanos.	87
Figura 24. Metodología HUZ. Fase 2: clasificación espacial de los clústeres urbanos de Madrid.	89
Figura 25. Metodología HUZ. Fase 3: verificación estadística de las Zonas Urbanas Homogéneas.	90
Figura 26. Metodología HUZ. Fase 3: Análisis estadístico para determinar si los clústeres urbanos identificados en Madrid pueden considerarse HUZ.	92
Figura 27. Metodología HUZ. Fase 4: Ponderación de límites de los indicadores urbanos. Definición de HUZs ampliadas.	93
Figura 28. Zonas Urbanas Homogéneas originales de Madrid (HUZ-Orig): representación geográfica y representatividad.	97
Figura 29. Promedios y rangos de los indicadores de bloque de manzana urbana para las HUZs de Madrid	98
Figura 30. Zonas urbanas homogéneas definitivas de Madrid: representación geográfica y representatividad	99
Figura 31. Definición de área de influencia (buffer) para cada uno de los edificios residenciales de Madrid.	108
Figura 32. Zonas urbanas homogéneas definitivas de Madrid. Aproximación edificio: representación geográfica y representatividad.....	110
Figura 33. Porcentaje de representatividad de los edificios HUZs según su aproximación. a) Considerando su huella edificatoria (derecha). B) Considerando su superficie construida (izquierda).....	111
Figura 34. Selección y localización de barrio y contexto urbano de edificios representativos HUZs.	116
Figura 35. Fichas descriptivas de las características geométricas de los edificios HUZs representativos.	119

Figura 36. Distribución de las superficies construidas de los edificios representativos HUZs.....	121
Figura 37. Transmitancia térmica y distribución de los sistemas constructivos de la envolvente térmica para los edificios representativos HUZs.	124
Figura 38. Comparación de temperaturas horarias simuladas (líneas de puntos) y monitorizadas (línea sólida) para las tipologías representativas HUZs HC, SC y SL.....	134
Figura 39. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) a nivel edificio para las viviendas colectivas representativas HUZs. Comparación de los climas actuales MET, IWECC y TMY y proyecciones SSP2 en 2050 y 2080.....	136
Figura 40. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) a nivel edificio para las viviendas unifamiliares representativas HUZs. Comparación de los climas actuales MET, IWECC y TMY y proyecciones SSP2 en 2050 y 2080.....	137
Figura 41. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs, para el clima TMY.....	139
Figura 42. Demanda de calefacción (azul) y refrigeración (rojo) desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL, para el clima SSP2 en el año 2050	140
Figura 43. Evolución anual de las temperaturas interiores a nivel edificio en las viviendas colectivas seleccionadas HC, SC y SL y temperaturas exteriores para el clima actual TMY y SSP2- 2050.....	141
Figura 44. Porcentaje de horas de confort promedio de la intensidad del estrés térmico a nivel edificio para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL. Comparación de los climas actuales MET, IWECC y TMY y proyecciones SSP2 en 2050 y 2080	143
Figura 45. Porcentaje de horas de confort promedio de la intensidad del estrés térmico desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL, para el clima TMY.....	144
Figura 46. Porcentaje de horas de confort y promedio de la intensidad del estrés térmico desagregado por edificio y por plantas para las viviendas colectivas representativas HUZs HC, SC y SL, para el clima SSP2 en el año 2050.....	145
Figura 47. Promedio de la intensidad de estrés por frío (azul) y calor (rojo) desglosado por horas para las tipologías representativas HUZs SC y SL en PM y PU par el clima actual TMY y el escenario futuro SSP2 en el año 2050.....	146
Figura 48. Demanda de calefacción y refrigeración de Madrid, obtenida a través de la metodología HUZ153	
Figura 49. Indicador del nivel de exposición (combinación de demanda de calefacción y refrigeración) para la ciudad de Madrid.	154
Figura 50. Indicador del nivel de vulnerabilidad (renta neta media por hogar) para la ciudad de Madrid.....	155
Figura 51. Índice de riesgo energético (nivel de exposición y riesgo) para la ciudad de Madrid.	156
Figura 52. Nivel de exposición y vulnerabilidad. Índice de riesgo energético asociado a las HUZs....	157

Figura 53. Índice de riesgo energético asociado a las HUZs, mostrando sus valores medios (cruces), mediana (línea horizontal), rango intercuartil (caja) y valores atípicos (puntos).....	158
Figura 54. Aproximación mediante promedios de índice de riesgo térmico y tipología HUZ en los barrios de Madrid.	159

Lista de tablas

Tabla 1. Factores de riesgo térmico o energético. Combinación de alta exposición y vulnerabilidad .	28
Tabla 2. Principales características de la normativa española en materia de mínimos térmicos y calidad del aire. Se destaca los valores que aplicarían a la ciudad de Madrid	61
Tabla 3. Metodología HUZ. Fase 1: indicadores de manzanas urbanas representativas.....	86
Tabla 4. Metodología HUZ. Fase 2: resultados de la combinación de tres bases de datos urbanas para conglomerados urbanos preexistentes en Madrid.	89
Tabla 5. Zonas urbanas homogéneas de Madrid: imágenes representativas y sus valores de rango (máximo y mínimo). Valores < 0 se consideran 0.....	95
Tabla 6. Clasificación HUZ desde la aproximación urbana de cobertura urbana de suelo (pixel) y aproximación edificatoria de área de influencia (buffer), cuantificando sus ítems originales y ampliados.....	111
Tabla 7. Asimilación de las tipologías edificatorias HUZs a las clasificaciones de caracterización edificatoria para el análisis energético.	113
Tabla 8. Definición de la clase constructiva para cada tipología HUZ desde la aproximación edificatoria.	113
Tabla 9. Solape de enfoque urbano, edificatorio y constructivo. Localización de edificios representativos HUZ.	114
Tabla 10. Revisión bibliográfica de los casos de estudio para la caracterización energética analizados en Madrid.	115
Tabla 11. Indicadores edificatorios para la caracterización de edificios representativos HUZs	117
Tabla 12. Tabla resumen de las características geométricas y edificatorias de los edificios representativos HUZs.	120
Tabla 13. Caracterización de las clases constructivas. Sistemas, materiales y propiedades térmicas.	123
Tabla 14. Condiciones operacionales y perfil de uso para espacios residenciales de uso privado.....	125
Tabla 15. Cálculo de las temperaturas umbrales de confort interior para las diferentes categorías de nivel de expectativa según la norma EN 16798	132
Tabla 16. Valores medios, mínimos y máximos de temperatura del aire exterior e interior de las viviendas para los casos simulados y monitorizados en el periodo de análisis (15-25 de agosto 2024).	134
Tabla 17. Valores límites de error y su cálculo para las viviendas monitorizadas en el periodo de análisis (15-25 de agosto 2024).	134
Tabla 18. Definición de riesgo energético. Combinación de demanda energética y renta media de los hogares.	152
Tabla 19. Cálculo de deciles para el parámetro promedio de renta media neta de los hogares de Madrid	154

Abreviaturas y acrónimos

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AROPE	Índice Riesgo de Pobreza o Exclusión Social. <i>At Risk of Poverty or Social Exclusion Index</i>
ARRUR	Área de Regeneración y Renovación Urbana y Rural
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BEM	<i>Modelos Energéticos de Edificios. Building Energy Models</i>
BSO	<i>Observatorio Europeo del Parque Edificatorio. EU Building Block Observatory</i>
BuildDens	Densidad de edificios [Nº Edificios/km ²]. <i>Building Density</i>
BuildFoot	Huella de la edificación [%]. <i>Building Foot Print Area</i>
BuildHeight	Altura de la edificación [m]. <i>Buildng Height</i>
BuiltUp	Área construida [%]. <i>Built-Up Area</i>
Cargas	Cargas internas del edificio debido a actividades humanas y al uso de equipos [W/m ²]
CDD	Grados-día de refrigeración [°C·día]. <i>Cooling Degree Days</i> .
CDF	Función de distribución acumulada. <i>Cumulative distribution function</i>
CLC	Corine Land Cover
ConsYear	Año de construcción de la edificación [año]. <i>Contruction Year</i>
ContronoSup	Contorno de la superficie de la edificación (envolvente y adiabática) [m ²]
CTE	Código Técnico de la Edificación
CV(RMSE)	Coeficiente raíz del error medio cuadrático
DGCE	Dirección General del Catastro de España
DI	Índice de malestar. <i>Discomfort Index</i>
DweDens	Densidad de viviendas [Nº Viviendas/km ²]. <i>Dwellings Density</i>
ECA&D	Proyecto de evaluación y conjunto de datos sobre el clima europeo. <i>European Climate Assessment & Dataset Project</i>
ECH	Encuesta Continua de Hogares
ECV	Encuesta de las Condiciones de Vida
EPBD	Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios. <i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPF	Encuesta de Presupuestos Familiares
ERESEE	Estrategia a Largo Plazo de Rehabilitación Energética del Sector de la Edificación en España
ERRP	Entornos Residenciales de Rehabilitación Programada
ET	Temperatura Efectiva. <i>Equivalent Temperature</i>
ETR	Rango de temperatura extrema [°C]. <i>Extreme Temperature Range</i>
EU-SILC	Estadísticas de la UE sobre ingresos y condiciones de vida. <i>EU statistics on income and living conditions.</i>

FD	Días helados [días]. <i>Frost Days</i>
FS	Estadística Finkelstein-Schafer
GCMs	Modelos Climáticos Globales. <i>Global Climate Models</i> .
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gh	Radiación global horizontal [W/m ²]
GreenArea	Área verde pública [%]. <i>Public Green Area</i>
HA	Hormigón Armado
HDD	Grados-día de calefacción [°C·día]. <i>Heating Degree Days</i> .
HI	Índice de calor. <i>Heat Index</i>
HR	Humedad relativa [%]
HSI	Índice de estrés por calor. <i>Heat Stress Index</i>
HUZ Class: B_CA	Bloques de Manzana Cerrada. <i>Collective Attached Blocks</i>
HUZ Class: B_DH	Bloques Altos de Doble Hilera. <i>Double Long High-rise Blocks</i>
HUZ Class: B_DL	Bloques Bajos de Doble Hilera. <i>Double Long Low-rise Blocks</i>
HUZ Class: B_HC	Bloques del Casco Histórico. <i>Historical Centre Blocks</i>
HUZ Class: B_HE	Bloques de Ensanche Histórico. <i>Historical Extension Blocks</i>
HUZ Class: B_SC	Bloques Colectivos Semiabiertos. <i>Semi-open Collective Blocks</i>
HUZ Class: B_SH	Bloques Altos de Hilera simple o Torres. <i>Simple Tower High-rise Blocks</i>
HUZ Class: B_SL	Bloques Bajos de Hilera Simple. <i>Simple Long Low-rise Blocks</i>
HUZ Class: H_DS	Unifamiliares Aisladas o Pareadas. <i>Detached/Semi-detached Houses</i> .
HUZ Class: H_DV	Unifamiliares Aisladas o Pareadas Vintage. <i>Detached/Semi-detached Houses Vintage</i>
HUZ Class: H_TS	Unifamiliares Adosadas o en Hilera. <i>Terraced/Row Houses Houses</i> .
HUZ Class: H_TV	Unifamiliares Adosadas o en Hilera Vintage. <i>Terraced/Row Houses Houses Vintage</i>
HUZ-Buffer	Zonas Urbanas Homogéneas a nivel edificatorio (<i>buffer</i>)
HUZ-Cons	Zonas Urbanas Homogéneas a nivel constructivo (<i>constructivo</i>)
HUZ-Ext	Zonas Urbanas Homogéneas extendidas (clasificación <85%)
HUZ-Orig	Zonas Urbanas Homogéneas originales (clasificación 100%)
HUZ-Pix	Zonas Urbanas Homogéneas a nivel urbano (pixel)
HUZs	Zonas Urbanas Homogéneas. <i>Homogeneous Urban Zones</i> .
HVAC	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado. <i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>
ICU	Isla de Calor Urbana
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IECM	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid
IEE	Informe de Evaluación del Edificio
INE	Instituto Nacional de Estadística
Inf	Infiltración del aire exterior en el edificio [ren./h].

InnerCourt	Patio interior privado [%]. <i>Private Inner Courtyard</i>
INV	Instituto Nacional de la Vivienda
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	Organización Internacional de Normalización. <i>International Organization for Standardization</i>
IWEC	Clima internacional para cálculos energéticos. <i>International Weather for Energy Calculations</i>
K_g	Transmitancia térmica global [W/m^2K]
K-S	Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov
LBNL	<i>Laboratorio nacional de Berkeley. Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
LCZ	Zonas Climáticas Locales. <i>Local Climate Zones</i>
LOE	Ley de Ordenación de la Edificación
LM	Ladrillo macizo
LHS/LHD	Ladrillo hueco simple /Ladrillo hueco doble
M	Potencia metabólica
MAE	Media absoluta del error
MEAN	Promedio de la muestra
MODP	Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid
NBE	Normas Básicas de la Edificación
NMBE	Porcentaje del error medio de sesgo normalizado
NREL	<i>Laboratorio estadounidense de energías renovables.</i> <i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NTE	Normas Tecnológicas de la Edificación
NZ	Norma Zonal de acuerdo al Plan General de Ordenación Urbana de Madrid.
nZEB	Edificios de consumo de energía casi nulo. <i>Nearly Zero Energy Building.</i>
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OUT_SET*	Índice de la temperatura efectiva estándar exterior. <i>Out Standard Effective Temperature Index</i>
PAUs	Planes de Actuación Urbanística
PB	Planta baja de la edificación
PCG	Potencial de Calentamiento Global
Perfiles	Presencia de personas y el uso de los espacios [intensidad/hora].
PET	Índice de temperatura psicológica equivalente. <i>Physiologically Equivalent Temperature Index</i>

PGOUM	Plan General de ordenación urbana de Madrid
PM	Planta media de la edificación
PMV-PPD	Voto Medio Predicho - Porcentaje Predicho de Insatisfechos. <i>Predicted Mean Vote- Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PNAEE	Plan Nacional de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
PT	Índice de la temperatura percibida. <i>Percived Temperature Index</i>
PU	Planta última de la edificación
q1 y q3	Percentil del 25 y 75% respectivamente
Qcond	Pérdida de calor por conducción
Qconv	Pérdida de calor por convección
Qrad	Pérdida de calor por radiación
Qres	Pérdida de calor por respiración
Qsud	Pérdida de calor por sudoración
RCPs	Sendas Representativas de Concentración. <i>Representative Concentration Pathways</i> .
RH	Media de la humedad relativa diaria. <i>Mean of daily Relative Humidity</i>)
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
RMSE	Error medio cuadrático
SATE	Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior
SCATs	Proyecto de Controles Inteligentes y Confort Térmico. <i>Smart Controls and Thermal Comfort Project</i> .
SD	Desviación estándar. Standard Desviation
SHGC	Coefficiente de ganancia de calor solar [adimensional]. <i>Solar Heat Gain Coefficient</i> .
SSPs	Sendas Socioeconómicas Compartidas. <i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
SU	Días de Verano [días]. <i>Summer Days</i> .
SupConstr	Superficie construida según el uso edificatorio [m ²].
SWEC	Clima español para para cálculos energéticos. <i>Spanish Weather for Energy Calculations</i>
Ta	Temperatura del aire [°C]
Tmrt	Temperatura media radiante [°C]
TMY	Año Meteorológico Tipo. <i>Typical Meteorological Year</i>
Top	Temperatura óptima interior [°C]
TR	Noches Tropicales. <i>Tropical Nights</i>
U	Transmitancia térmica del elemento constructivo [W/m ² K]
UBEM	<i>Modelos Energéticos de Edificios Urbanos. Urban Building Energy Models</i>
UCL	Capa de Dosel Urbano. <i>Urban Canopy Layer</i>
UE	<i>Unión Europea</i>
UrbCanyon	Cañón Urbano [adimensional]. <i>Urban Canyon Aspect Ratio</i>

UTCI	Índice de confort térmico universal. <i>Universal Thermal Comfort Index</i>
Ventilación	Intercambio de aire entre el interior y el exterior [ren. /h].
VPO	Viviendas de Protección Oficial
Vv	Velocidad del viento [m/s]
W	Potencia mecánica
WalkArea	Área caminable [%]. <i>Walkable Area</i>
WBGT	Índice de temperatura del globo húmedo. <i>Wet Bulb Globe Temperature Index</i>
WUDAPT	Base de Datos Mundial Urbana y Herramientas de Portal de Acceso <i>World Urban Database and Access Portal Tools</i>
WWR	Ratio muro-ventana [adimensional]. <i>Window-Wall Ratio</i> .
α	Nivel de significancia en la prueba de bondad de ajuste
Θ_{mr}	Temperatura media externa móvil [°C]